

## Inhalt

1 Aufgabenstellung .....	6
2 Fahrradtypen und Baugruppen von Fahrrädern .....	7
2.1 Pendelschlagwerk .....	10
2.2 Fahrradgabel .....	10
2.3 Steuersatz .....	13
2.4 Federgabeln .....	14
2.5 Laufräder .....	14
2.6 Naben .....	15
2.7 Geometriebestimmung .....	16
2.8 Pendelschlagwerk .....	17
2.9 Testablauf bei der Firma velotech.de .....	18
2.10 Testablauf nach EN 14764 .....	19
3 Auswertung und Messmittelbestimmung .....	20
3.1 Auswertung der defekten Räder von BASF .....	20
3.2 Vermessung der Crashräder der Firma BASF .....	20
3.3 Untersuchung der Komponenten .....	21
3.3.1 Materialbestimmung .....	22
3.3.2 Vermessung der Lagerschaleneindrücke durch die Lagerkugeln (Steuersatz) .....	23
3.4 Experimentelle Spannungsanalyse nach dem Reißlackverfahren .....	24
3.4.1 Prinzip des Reißlackverfahrens .....	24
3.4.2 Lackierung .....	25
3.4.3 Belastung des Bauteils .....	26
3.4.4 Aufreißen der Dehnlinien .....	26
3.4.5 Dehnlinienfelder .....	28
3.5 Grundlagen der Dehnmessstreifen-Technologie .....	29
3.5.1 Aufbau .....	29
3.5.2 Funktionsweise und Befestigung .....	29
3.5.3 Messgitterwerkstoffe .....	31
3.5.4 Dehnungsempfindlichkeit .....	32
3.5.5 Elektrische Belastbarkeit .....	33

3.5.6 Verkabelung und Schaltungsaufbau.....	35
3.6 Arten von Brückenschaltungen .....	36
3.6.1 Messung am Zugstab.....	38
3.6.2 Messung am Biegestab.....	39
3.7 Fehlerbetrachtung für DMS.....	40
4 Prüftechnikstandard .....	41
5 Rechnergestützte Untersuchung von Baugruppen .....	45
5.1 Erstellen von 3D CAD Modellen.....	45
5.2 Vergleich der Spannungsanalyse .....	45
5.3 Vergleich Stoßprüfung EN 14764 und Firma velotech.de.....	47
5.3.1 Test nach EN 14764 .....	47
5.3.2 Test nach Firma velotech.de .....	49
6 Versuchsablauf .....	50
6.1 Auswahl der Fahrzeuge.....	50
6.1.1 Vorbereitung des Fahrzeuges .....	50
6.1.2 Versuchsstrecke .....	50
6.1.3 Auswahl der Messmittel .....	51
6.1.4 Erfassung der Messwerte .....	51
6.2 Ablauf der Testfahrten.....	52
6.3 Schlagpendel.....	53
7 Kalibrierung und Fehlerbetrachtung .....	56
7.1 Fehlerrechnung.....	56
7.2 Kalibrierung .....	57
8. Auswertung der Messreihen.....	60
8.1 Ergebnisse Fahrversuche.....	60
8.2 Ergebnisse Prüfstand .....	61
8.2.1 Unterschied beider Systeme .....	62
8.2.2 Ergebnisse Modell Schieber .....	62
8.2.3 Ergebnisse Modell Alu MTB I.....	63
8.3 Vergleich der Prallsysteme .....	63
9 Vergleich Fahrversuche und Prüfstand .....	65
9.1 Auswertung der Stahlrahmenfahrräder .....	65

9.2 Alu MTB I .....	67
9.3 Zusammenfassung der Ergebnisse. ....	69
10 Schlussfolgerung .....	71
11 Zusammenfassung .....	78
12 Ausblick.....	80
13 Verzeichnisse .....	83
13.1 Abbildungsverzeichnis.....	83
13.2 Tabellenverzeichnis.....	85
13.3 Diagrammverzeichnis.....	86
13.4 Literaturverzeichnis.....	87
14 Anhang .....	89
14.1 Materialgutachten .....	89
14.2 Kugeleindruckkräfte.....	91
14.3 Datenblatt Kraftmessdose.....	92
14.4 Rahmengeometrie eines Stahlprüflings vor und nach dem Test.....	93
14.5 Skizze Versuchsablauf.....	95
14.6 Beispielbilder von Fahrrädern der BASF.....	96
14.7 Verformungsdaten der Räder von BASF .....	97
14.8 Bilder Applizierter DMS.....	98
14.9 Eidesstattliche Erklärung.....	99

## 0 Einleitung

Die Sicherheit und das Wohl des Verbrauchers ist der Hintergrund für das Entstehen einer jeden Richtlinie. Diese Richtlinien gewährleisten dem Verbraucher, dass die von ihm gekauften Waren bestimmten Sicherheitsstandards genügen. Hersteller müssen anhand dieser Richtlinien ihre Produkte nach dem aktuellen Stand der Technik prüfen. Es ist den Unternehmen freigestellt, ob sie die teilweise sehr komplexen Prüfungen im eigenen Hause durchführen oder diese Aufgaben an spezialisierte Dienstleister abgeben.

Solch ein Dienstleister ist die Firma velotech.de GmbH, die in der fränkischen Stadt Schweinfurt seit ihrer Entstehung 1991 muskelbetriebene Sportgeräte jeder Art auf ihre Produktsicherheit prüft. Der Gründer Ernst Brust setzt sich seit 1990 für die Bestellung und Verteidigung von Sachverständigen für Fahrradschäden und -bewertungen durch die regionalen Industrie- und Handelskammern ein. Ein Schwerpunkt wurde auf die Prüfung von Fahrradteilen und Fahrrädern im gesamten gelegt. Die Firma beschäftigt derzeit 10 Angestellte, die Arbeitsfläche verteilt sich dabei auf 3 Etagen mit ca. 750m<sup>2</sup> Gesamtfläche.

Geprüft wird nach neuesten Sicherheitsstandards, Zertifizierungen nach DIN plus der DIN Certco GmbH Berlin sind ebenfalls möglich.

Es ist erforderlich, die Prüfstände in regelmäßigen Abständen zu überprüfen und gegebenenfalls an den neusten Stand der Technik anzupassen. Auch Firmen, die ihren Mitarbeitern Fahrrädern zur Verfügung stellen, sind daran interessiert, dass ihre Mitarbeiter sicher unterwegs sind. Die Fa. BASF beispielweise verfügt in Ludwigshafen über einen Fuhrpark von ca. 18.000 Fahrrädern bei 46.000 Beschäftigten. Das Werk erstreckt sich über eine Fläche von ca. 11km<sup>2</sup>, da ist die Nutzung von Fahrrädern durch die Mitarbeiter durchaus sinnvoll. Da die Räder auch außerhalb des Werksgeländes genutzt werden dürfen, ist eine ordnungsgemäße Ausstattung nach StVZO notwendig. Außerdem müssen die Fahrräder die nötigen Sicherheitsstandards einhalten und eine Homologation in Form des GS erhalten. Im Rahmen dessen führt die Fa. BASF jedes Jahr am Tag der offenen Tür eine Vorführung über diverse Verkehrs- und Werksunfälle

durch. Die dabei zerstörten Fahrräder dienen als Grundlage für die nachfolgende Arbeit.

## 1 Aufgabenstellung

Fahrräder unterliegen unterschiedlichen Betriebslasten. Der Hauptanteil von schädigenden dynamischen Belastungen wird über die Vorderradachse in das System eingeleitet. Fahrbahnstöße, Bremsbelastungen und Frontalaufprallbelastungen verursachen Spannungen in den tragenden Bauteilen, wenn durch sie die Masse des Fahrzeuges, dessen Fahrers und dessen evtl. Zuladung beschleunigt werden.

Sicherheitstechnische Untersuchungen der Rahmen-/Gabeleinheiten erfordern neben statischen und Wechselbiegebelastungen auch Frontalstöße im Prüflastkollektiv.

Aufgabe ist es, die in der Realität auftretenden Belastungen im Labor auf einem Prüfstand nachzubilden. Es soll untersucht werden, ob das Pendelschlagwerk der Fa. velotech.de geeignet ist, um realitätsnahe Frontalstoßbelastungen zu simulieren.

## 2 Fahrradtypen und Baugruppen von Fahrrädern

Rein äußerlich werden Räder nach Rahmenformen und nach ihrer Ausstattung unterschieden.

Aktuell werden Fahrradtypen in folgende Kategorien unterteilt (Abbildung 1):

- Standardtypen,
- Sporträder,
- Kinderfahrräder,
- Sonderkonstruktionen und
- Fahrräder mit Hilfsantrieb.

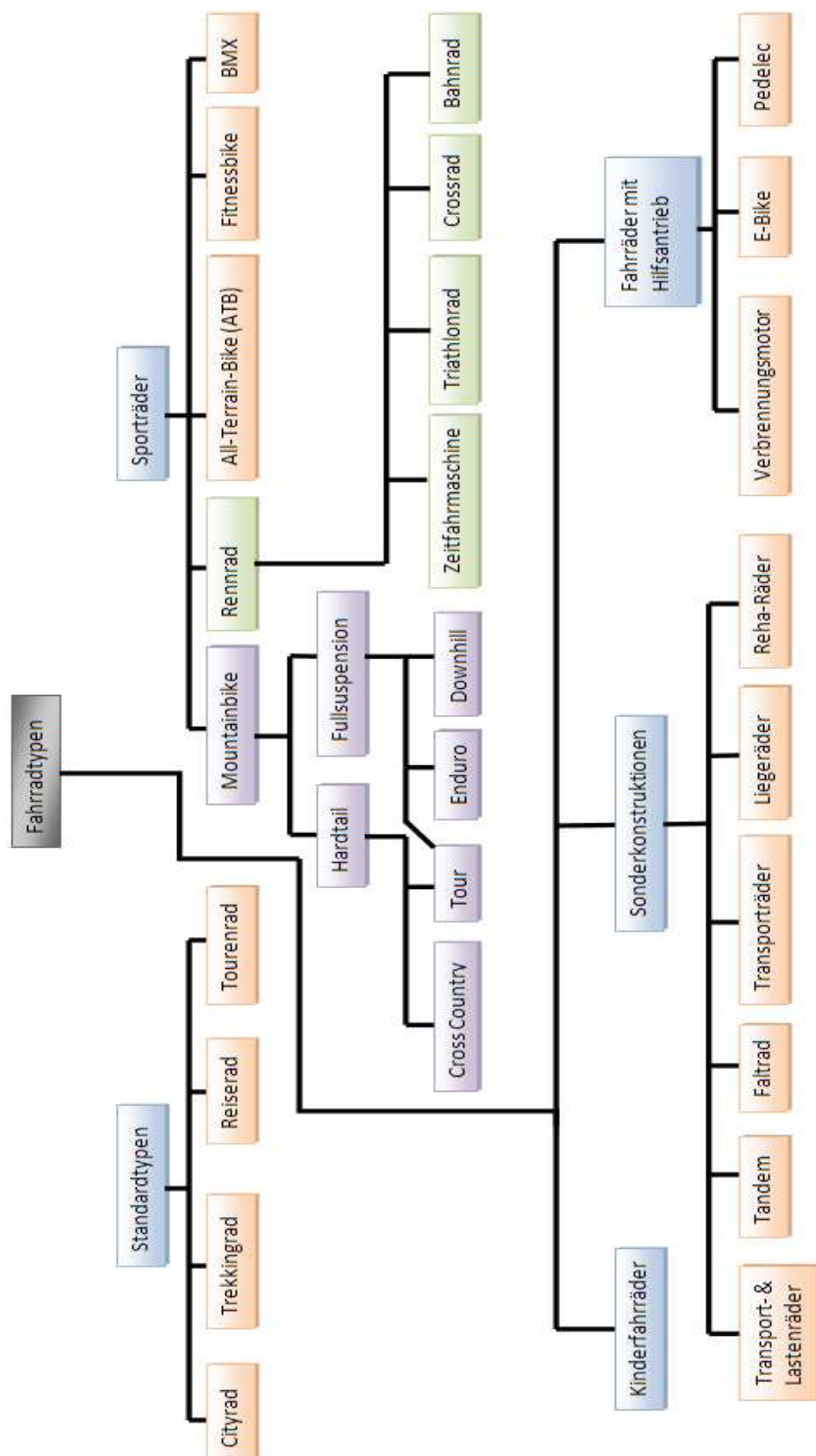


Abbildung 1 Auflistung der Konstruktionsprinzipien starrer und gefederter Modelle aller Gebrauchsnutzertypen. [Fachkunde Fahrradtechnik 2009]



Standardtypen sind Fahrräder für den normalen und alltäglichen Gebrauch; in diese Kategorie fallen das Cityrad und das Trekkingrad. Das Cityrad ist das bequeme Fahrrad mit aufrechter Sitzposition für kurze Strecken, die Damenvariante hat meist einen tiefen Einstieg. Rahmenwerkstoffe sind Chrom-Molybdän oder Aluminium. Die Laufradgrößen sind 26" oder 28".

Die meist verbreiteten Sportradtypen sind das Mountainbike, Rennrad und das Fitnessbike. Für einzelne Sportarten, wie Radpolo, BMX oder Kunstradfahren, gibt es eigene Radtypen. Rahmengeometrie und Sitzposition sind dem jeweiligen Einsatzzweck angepasst. Im Rennradbereich wird z.B. eine flache Sitzhaltung angestrebt, um einen möglichst geringen Luftwiderstand zu erreichen. Die Rahmenmaterialvielfalt reicht vom einfachen Chrom-Molybdän-Rahmen bis zu Rahmen aus Kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK).

Kinderfahrräder sind speziell auf die Bedürfnisse und Körpermaße von Kindern ausgelegt. Ihre Ausstattung und Sicherheit gleichen der von Erwachsenenfahrrädern. Komponenten wie Bremsgriffe oder Tretkurbeln sollten kindergerecht ausgelegt sein.

Sonderkonstruktionen sind Fahrräder für besondere Einsatzzwecke. Unter diese Spezifikation fallen Räder wie das Tandem, Liegerad-Faltrad (Klapprad) oder Transporträder für Industriebetrieb.

Bei Fahrrädern mit Hilfsantrieb wird in zwei Kategorien unterschieden: Fahrräder mit Elektromotor und mit Verbrennungsmotor. Wie für den Betrieb eines Mofas ist für Personen, die nach dem 01.04.1965 geboren sind, eine Mofa-Prüfbescheinigung erforderlich. Es wird weiterhin eine Betriebserlaubnis und ein Versicherungskennzeichen benötigt.

Fahrräder mit Elektromotor werden in die Kategorien E-Bike und Pedelec (Pedal-Electric-Cycle) unterteilt. Für das E-Bike gelten die gleichen Vorschriften wie für das Fahrrad mit Verbrennungsmotor.

Das Pedelec-System ist an die Muskelkraft des Fahrers gekoppelt. Der Motor unterstützt nur, wenn die Pedale getreten werden, welches durch Kraft-

oder Bewegungssensoren überwacht wird. Steigt die Geschwindigkeit über 25 km/h oder wird das Pedalieren unterbrochen, setzt der Motor aus. Um ein Pedelec zu führen sind weder Führerschein, Helm noch Zulassungsschein notwendig.

## 2.1 Pendelschlagwerk

Um Ist-Werte von wichtigen beschriebenen Größen von Fahrradrahmen und Fahrradgabeln zu ermitteln, wurden spezielle Prüfstände entwickelt und gebaut. Diese Versuche sind auch notwendig, um rechnerische Untersuchungen durchzuführen.

Das Pendelschlagwerk dient zur Feststellung von Schäden beim Frontalstoß.

## 2.2 Fahrradgabel

Die Gabel gehört zum Steuersystem, zudem auch Steuersatz (Steuerlager), Vorbau und Lenker gehören. Die Gabel dient als Halterung für das Vorderrad und ermöglicht durch ihre drehbare Lagerung im Steuerrohr des Rahmens schnelle und präzise Lenkbewegungen.

Durch das Gabelschaftrohr stellt die Gabel eine Verbindung mit Vorbau und Lenker her und absorbiert als elastisches Bauteil die Fahrbahnstöße. In Abbildung 2 sind alle Bestandteile eines Fahrrades dargestellt.

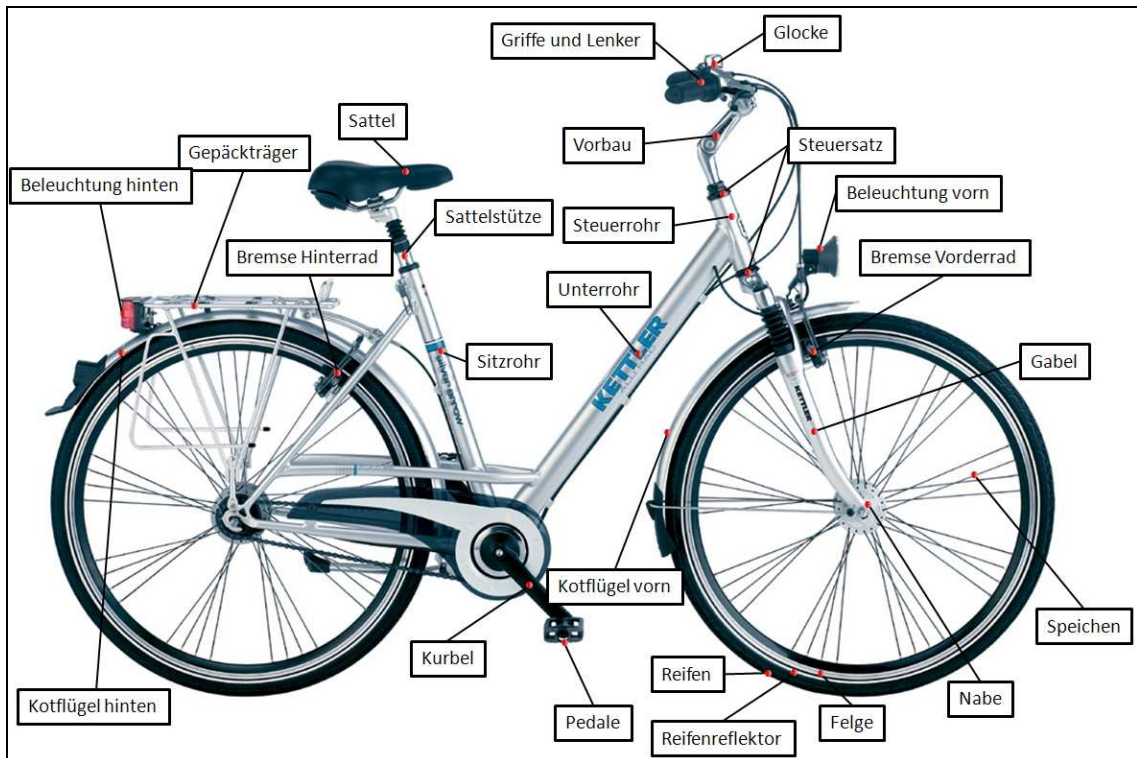


Abbildung 2 Bestandteile des Fahrrades [velotech.de 2010]

Um die Biegespannungen beim Bremsen möglichst gering zu halten, besitzt der Gabelschaft im unteren Bereich eine größere Wandstärke. Durch die hohen Belastungen wurden kleine 1" Schäfte durch 1 1/8" bis 1 1/2" abgelöst. Damit wird die Steifigkeit und vor allem die Bruchsicherheit erheblich erhöht. Da starre Gabeln fest und komfortabel zu gleich sein müssen, hat sich folgende Konzeption bewährt: die Gabelbeine sind im oberen Bereich (Bereich des größten Biegemomentes) längsoval und werden zu den Ausfallenden<sup>1</sup> hin dünner und runder. Eine möglichst weit unten angesetzte Vorbiegung der Gabelbeine verbessert den Fahrkomfort bei Fahrbahnstößen. Je weiter sich die Vorbiegung zur Gabelmitte hin orientiert, desto spürbarer verschlechtert sich der Fahrkomfort. Werden gerade Gabelbeine, die schräg vom Gabelkopf zu den Ausfallenden verlaufen, benutzt, können Fahrbahnstöße lediglich in Fahrtrichtung ausgependelt werden.

<sup>1</sup>Ausfallende = Radbefestigungspunkte an Gabel und Rahmen



Abbildung 3 Gabelmuffen [Fachkunde Fahrradtechnik 2009]

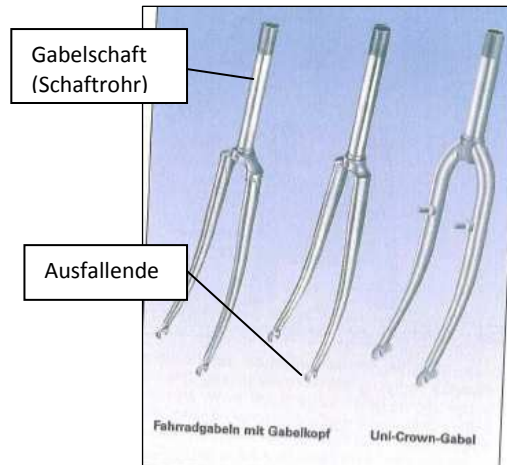


Abbildung 4 Starrgabeltypen  
[Fachkunde Fahrradtechnik 2009]

Ausführung und Fertigung von versuchsrelevanten Fahrradbauteilen werden im Folgenden erläutert.

Klassische Fahrradgabeln aus Stahl und Aluminium werden aus Gabelbeinen, Ausfallenden und Gabelschaft gelötet oder geklebt. Bei gemufften Gabelköpfen unterscheidet man zwischen Innen- und Außengemufften (Abbildung 3). Moderne Gabeln verzichten ganz auf den Gabelkopf. Die sog. Uni-Crown-Gabel besitzt Gabelbeine, die für den Reifendurchlass gebogen und an den in diesem Bereich verstärkten Gabelschaft geschweißt werden [Fachkunde Fahrradtechnik 2009] (Abbildung 4).

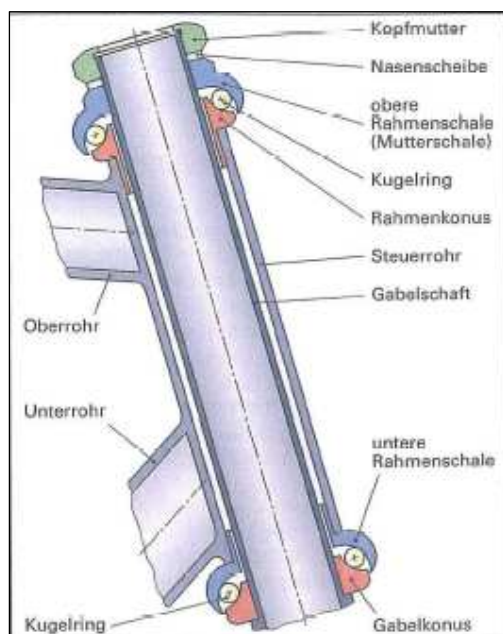


Abbildung 5 Konventioneller Steuersatz  
[Fachkunde Fahrradtechnik 2009]

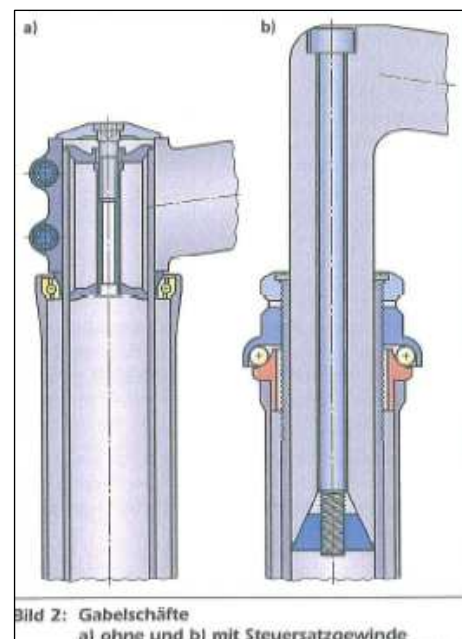


Bild 2: Gabelschaft  
a) ohne und b) mit Steuersatzgewinde

Abbildung 6 Gabelschaft  
[Fachkunde Fahrradtechnik 2009]

Bei modernen Federgabeln wird dieser Gabelkopf auch als Gabelkrone bezeichnet. Das sog. Ausfallende dient am unteren Ende der Gabel zur Laufradbefestigung.

Durch Ahead-Vorbauten kann auf das Gabelschaftgewinde verzichtet werden. So wird eine steifere und bruchsicere Verbindung von Vorbau zu Gabel möglich. Außerdem wird die Fertigung vereinfacht und der Einsatz von CFKs als Schaftmaterial ermöglicht (Abbildung 5).

## 2.3 Steuersatz

Das auch als Steuerlager bezeichnete System besteht aus einem unbeweglichen, unteren Lagerteil und einem oberen, verstellbaren Lager. Der Steuersatz ist als ein kugel- oder rollengelagertes Rotationslager ausgelegt. Zum Einsatz können unterschiedliche Arten von Kugel oder Nadellagern kommen, z.B. einstellbare, mehrteilige Schrägschulter- bzw. Konenlager. Es wird in konventionelle und gewindelose Steuersätze (Ahead Steuersätze) unterschieden. Der Steuersatz überträgt die Fahrbahnstöße in den Rahmen, weshalb sich die Steuersätze lockern können. Ursache hierfür ist das Drücken der Rollen oder Kugeln in die Laufbahnen der Lagerschalen.

Die Bauweise konventioneller Steuersätze:

Konventionelle Steuersätze bestehen aus dem Gabelkonus, Rahmenkonus der unteren und der oberen Rahmenschale (bewegliche Mutterschale) und Kopfmutter. Durch eine Presspassung werden die untere Rahmenschale, der Rahmenkonus im Steuerrohr und der Gabelkonus auf dem Gabelschaft fixiert. Das Lagerspiel wird mit der Mutterschale und der Kopfmutter eingestellt und durch Konterung gesichert (Abbildung 6). Um die Konterung mit nur einem Schlüssel vornehmen zu können, liegt häufig eine Nasenscheibe zwischen Mutterschale und der Kopfmutter. Die Nase greift in die Nut des Gabelschaftes und verhindert beim Kontern das Mitdrehen der Mutterschale. Bei sportlich genutzten Fahrrädern entfällt diese Gabelschaft schwächende Nut. Ahead-Steuersätze erfordern eine andere Spannvorrichtung, da der Steuersatz nicht mehr geschraubt ist. Durch eine Feder-

Kralle, die in den Gabelschaft eingeschlagen ist, wird das Lagerspiel eingestellt. Am Vorbau wird eine Abdeckkappe aufgelegt, welche die Einstellschraube aufnimmt (Abbildung 7). Mit dieser Schraube wird über die Kralle die Gabel nach oben gezogen. Bei Gabelschaften aus CFK darf diese Art von Kralle nicht verwendet werden. Der Markt bietet aber entsprechende Alternativen an (z.B. Spannkralle).

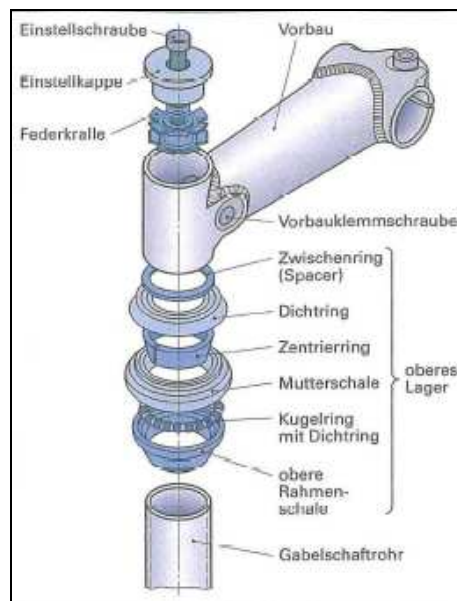


Abbildung 7 Steuerlager mit Aheadvorbau [Fachkunde Fahrradtechnik 2009]

Durch einen konischen Zentrierring wird die gewindelose Mutterschale mittig ausgerichtet. Eine Höhenverstellung des Lenkers kann nur durch das unterlegen von Zwischenringen (Spacer) vorgenommen werden. Als Lager kommen meist gedichtete Kugellager oder Nadellager zum Einsatz. Bewährt hat sich die Kombination aus stark belastbarem Nadellager im unteren Bereich und Rillenkugellager im oberen Bereich.

## 2.4 Federgabeln

Fahrradfederungen tragen wesentlich zum Fahrkomfort bei. Fahrbahnstöße lassen hauptsächlich nur die Laufräder einfedern, so dass die Stoßkräfte für Sattel und Lenker erheblich verringert werden.

## 2.5 Laufräder

Die Laufräder liefern den nötigen Fahrbahnkontakt und tragen bei vergleichsweise kleinem Eigengewicht einen großen Teil der Last. Im Fahrbetrieb wird ein Teil der Federung und Dämpfung von ihnen übernommen. Sie bestehen aus Nabe, Speichen, Felge, Mantel und Innenschlauch. Eingespeicht zieht jede Speiche die Felge zu dem jeweiligen Nabenflansch hinunter und herüber. Durch gleichmäßige Speichenspannung stellt sich ein Gleichgewicht der Zugkräfte ein.

## 2.6 Naben

Die Naben sind ein Teil des Laufrades und stellen die Verbindung zwischen

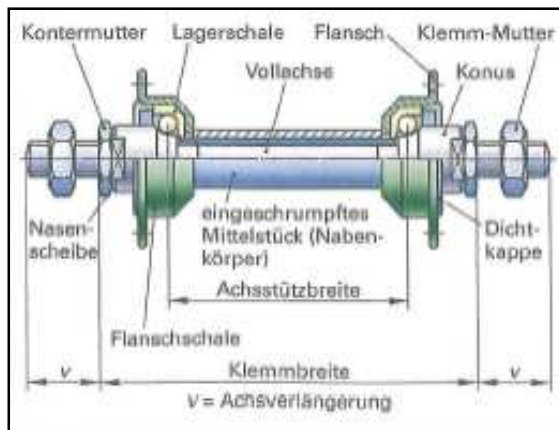


Abbildung 8 Einfache Nabenausführung mit Vollachse  
[Fachkunde Fahrradtechnik 2009]

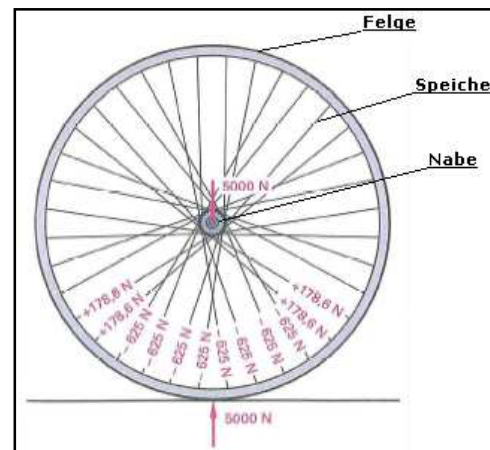


Abbildung 9 Belastung bei Vertikalstoß  
[Fachkunde Fahrradtechnik 2009]

Reifen/ Felge und Rahmen her (Abbildung 9). Nabenachsen werden entweder als Vollachsen mit Achsmuttern (Abbildung 8) oder als Hohlachse mit Schnellspannern ausgeführt. Der Nabenflansch wird entsprechend dem Speichenmuster oder der Speichenart gefertigt. Ein Unterscheidungsmerkmal ist die Einteilung der Naben in Vorderradnabe und Hinterradnabe [Fachkunde Fahrradtechnik 2009]. Die Lagerung übernehmen Kugellager; zur Anwendung kommen neben einfachen Konuslagerungen

auch Rillenkugellager (Industrielager). Gummidichtungen schützen die Lager vor Umwelteinflüssen.

## 2.7 Geometriebestimmung

Um vor und nach den Versuchen Unterschiede feststellen zu können, werden die Geometriedaten der Versuchsräder erfasst. Dazu bietet die Fa. velotech.de eine geeignete Messvorrichtung (Abbildung 10), mit deren Hilfe eine Geometriebestimmung der Fahrradrahmen möglich ist. Die Vorrichtung bietet die Möglichkeit Fahrräder zu vermessen (z.B. Lenkwinkel, Sitzwinkel, Tretlagerhöhe, Radstand usw.). Außerdem ist es möglich Spurversatz und Kettenlinie zu ermitteln, da der Messtaster bzw. Messdorn in allen 3 Achsen ( $x, y, z$ ) verschoben werden kann. Nachdem der Rahmen mit geeigneten Laufrädern ausgestattet wurde, wird das Fahrrad aufgespannt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Felgenflanken an den vorgegeben Fix-Punkten anliegen. Danach wird mittels eines Kreuzlinienlasers der Rahmen vertikal ausgerichtet. Das Tretlager bildet den Koordinatenursprung. Mithilfe eines Dorns werden die einzelnen Messpunkte angefahren. Die gesamte Streckenmessung wird mit einem inkrementellen Wegaufnehmer realisiert. Die Reihenfolge der Messpunkte wird gemäß Arbeitsanweisung durchgeführt. Die dabei ermittelten Koordinaten werden in eine Eingabemaske eingetragen. Danach wird die Rahmengenometrie errechnet.



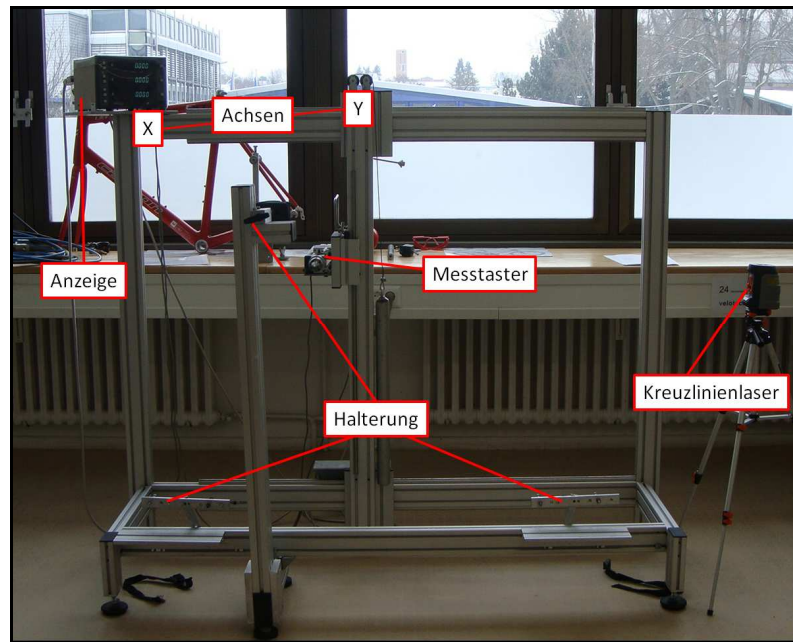


Abbildung 10 Rahmengenometrieerfassung [velotech.de 2010]

## 2.8 Pendelschlagwerk

Der Versuchsablauf ist ähnlich dem Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN 10045/91. Das Pendelschlagwerk dient der Ermittlung der Widerstandsfähigkeit von Fahrradrahmen gegen frontale Stöße. Der Rahmen wird bei normalen Tests mit immer größerer Aufprallenergie bis zum Versagen oder der maximalen Prüfenergie von 150J belastet. In dieser Arbeit wird die Problematik des einmaligen frontalen Aufpralls, wie sie z.B. bei einem Verkehrsunfall vorkommen kann, betrachtet. Im Versuchsablauf wird eine Probe am tiefsten Punkt der Pendelbahn in einem Widerlager eingespannt und der

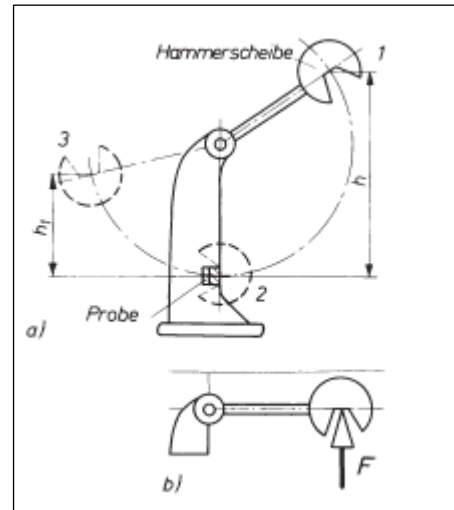


Abbildung 11  
Skizze Pendelschlagwerk  
[VDI Werkstoffkunde 16]

Hammer in die Ausgangslage [1] (Abbildung 11) angehoben. Die potentielle Energie  $E_{pot1}$  ist abhängig von der Fallhöhe  $h$ . Nach dem Ausklinken fällt der Hammer auf einer kreisförmigen Bahn in die tiefste Lage [2] (Abbildung 11). Dort ist seine potentielle Energie vollständig in kinetische Energie umgewandelt. In diesem Punkt überträgt die Hammerscheibe ihre Energie auf die Probe und zerschlägt sie [VDI Werkstoffkunde 16]. Die zum Bruch erforderliche Schlagarbeit  $W_{Schlag}$  wird vom Pendel aufgebracht, wodurch dessen Energie abnimmt. Beim Weiterschwingen erreicht die Hammerscheibe nur die kleinere Steighöhe  $h_1$  [3] (Abbildung 11) und besitzt dort eine kleinere potentielle Energie  $E_{pot2}$ . Diese Energie setzt sich aus  $E_{pot2} = E_{pot1} - W_{Schlag}$  zusammen.

## 2.9 Testablauf bei der Firma velotech.de

Der Rahmen wird am Tretlager eingespannt. Die an der Gabel befestigte Schlagrolle muss sich am tiefsten Punkt der Pendelbahn befinden. Der Hammer kann jedoch im Unterschied zum normalen Kerbschlagbiegeversuch nicht durchschwingen, sondern federt nach dem Aufprall zurück. Je größer die plastische Verformung ist, umso mehr Energie hat das Fahrrad aufgenommen. Die nicht übertragene kinetische Energie wird durch zurückfedern des Hammers wieder in potentielle Energie umgewandelt. Aus diesem Grund muss der Hammer nach dem Aufschlagen abgebremst werden, um ein weiteres Aufschlagen und damit ein Verfälschen der Messergebnisse zu verhindern. Die Beaufschlagung des Rahmens mit den

Gewichten simuliert den Fahrer und dämpft das Eigenschwingverhalten der Konstruktion. Der Rahmen wurde gemäß Arbeitsanweisung vorbereitet und aufgespannt.

## 2.10 Testablauf nach EN 14764

Der Testaufbau in der Norm unterscheidet sich in einigen Punkten vom Pendelschlagversuch. Der Rahmen wird nicht horizontal im Tretlagergehäuse befestigt, sondern senkrecht am hinteren Ausfallende eingespannt und es werden keine Gewichte angebracht. Der Schlag wird nicht von einem Pendelhammer ausgeführt, sondern von einem freifallenden Gewicht. Dieses Gewicht wird aus einer Höhe von 360mm fallen gelassen. Bei beiden Verfahren wird der Radstand vor und nach dem Schlag gemessen und der Rahmen auf evtl. Beschädigungen hin untersucht.

### 3 Auswertung und Messmittelbestimmung

#### 3.1 Auswertung der defekten Räder von BASF

Die plastische Verformung der defekten Fahrräder (Crashräder) lässt eindeutig auf einen frontalen Zusammenstoß mit einem Hindernis schließen. Die Verformungsunterschiede kommen durch verschiedene Hindernisse und Unfallsituationen zustande. Weitere Gründe sind das Alter der Fahrräder und der Aufprallwinkel. Dieser wird hier immer als senkrecht zur Prallfläche betrachtet. In der Praxis im Straßenverkehr sind es Hindernisse wie Autos, hohe Bordsteinkanten oder z.B. Blumenkübel mit denen der Radfahrer zusammenstoßen kann. Der Stuntman, der die Räder zerstört hat, nutzte für die Unfallnachstellung einen parkenden PKW. Das Hindernis, eine Autofelge, wird als nicht verformbar angesehen. Lackrisse und Absplitterungen deuten auf elastisches und plastisches Werkstoffverhalten hin. Bei einigen Mustern sind leichte Verformungen des Unter- und des Oberrohres an den Verbindungsstellen zum Innenlager, respektive Sattelrohr, zu sehen. Daraus lässt sich schließen, dass die beim Aufprall wirkende Energie nicht vollständig vom vorderen Teil des Rahmendreiecks absorbiert wurde. Ein Teil der wirkenden Kräfte wurde bis in den hinteren Teil des Rahmendreiecks weitergeleitet. Auffällig ist, dass das vordere Laufrad keine sichtbaren Beschädigungen aufweist. Ein außergewöhnlich großer Seitenschlag ist nicht feststellbar, auch die Lager der Nabe und deren Achse sind unbeschädigt. Die Reifen-/Schlauchkombination ist in allen Fällen unbeschädigt geblieben. Die kinetische Energie wurde von der Nabenachse über eine verschraubte Verbindung an die Gabel weitergegeben.

#### 3.2 Vermessung der Crashräder der Firma BASF

Zum Vermessen der Räder wird u.a. die Messvorrichtung der Fa. velotech.de verwendet, mit deren Hilfe die Rahmengeometrie vor und nach

dem Versuch aufgenommen werden kann. Als ausschlaggebendes Maß für die Verformungsarbeit werden der Radstand, die Änderung der Länge des Oberrohrs und der damit verbundenen Lenkwinkeländerung herangezogen (siehe Abbildung 12). Die Fahrräder haben im Durchschnitt ein Gewicht von 17,9kg. Ein Grund für die Gewichtsunterschiede sind Serienstreuung, Produktionschargen und unterschiedliche Baujahre. Der Modellname der Stahlfahrräder wird unter dem Modellnamen Schieber fortgeführt.



Abbildung 12 Beispielbild für den allgemeinen Zustand der Räder von BASF nach der Darstellung von Verkehrsunfällen (Verkehrsunfällen) durch den Stuntfahrer (Anhang 14.6)  
[velotech.de 2010]

### 3.3 Untersuchung der Komponenten

Nach der Vermessung werden die Fahrräder zerlegt und die einzelnen Komponenten genauer untersucht. Materialbestimmung und Untersuchung der Lagerschalen auf Abdrücke werden vorgenommen. So können genauere Aussagen über Art und Wirkung von Kräften getroffen werden. Ein Werkstoffgutachten über das verwendete Rahmenmaterial der verschiedenen Fahrräder ist ebenfalls notwendig (Anhang 14.7).

### 3.3.1 Materialbestimmung

Zur Materialuntersuchung wird ein Teil der alten Schieberräder zersägt und Proben zur Untersuchung geschickt (siehe Anhang 14.1). In Abbildung 13 ist ein zerschnittener Steuerrohrbereich zu sehen. Es ist klar zu erkennen, dass es zu einer Faltenbildung direkt hinter der Verbindungsmuffe (roter Bereich in Abbildung 12) gekommen ist. Die Gründe dafür sind vermutlich die Kerbwirkung und, dass sich der Materialdurchmesser verkleinert (Muffe + Rahmenrohr). Dadurch werden die Kräfte nur noch vom Materialquerschnitt des Ober- und Unterrohrs getragen; es gibt keine zusätzliche Stabilisierung. An dieser Stelle wirkt dann mit hoher Wahrscheinlichkeit das größte Biegemoment. Durch die plastische Verformung fließt das Material an der Oberseite der Rohre und wird sichtbar dünner. An der gegenüberliegenden Seite kommt es im Gegenzug zu Faltenbildung. Die Falten stapeln sich vor den Lötstellen.

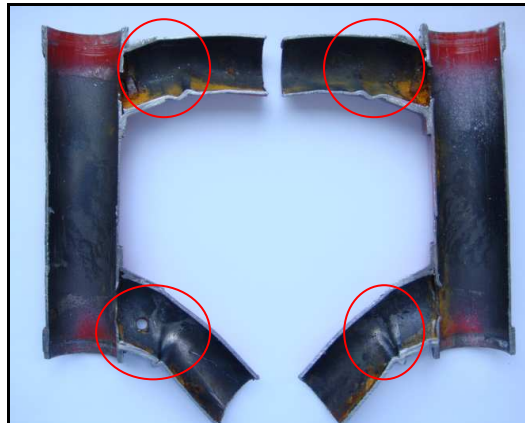


Abbildung 13 Schnittansicht Steuerrohrbereich Schieberrahmen [velotech.de 2010]

### 3.3.2 Vermessung der Lagerschaleneindrücke durch die Lagerkugeln (Steuersatz)

Bei der Untersuchung der Lagerschalen wurden bei einem Teil der Räder Kugellagerabdrücke in den Lagerschalen festgestellt. Diese Abdrücke, sind durch die Kollision entstanden. Da die Steuerlager die Verbindung zwischen

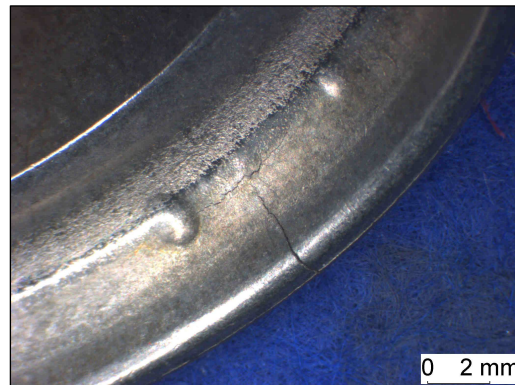


Abbildung 14 Kugellagerabdrücke in den Lagerschalen [velotech.de 2010]

Rahmen und Gabel darstellen, werden beim Verbiegen der Gabel die Kräfte über die innere Lagerlaufbahn, die mit der Gabel verbunden ist, an die Kugel weitergegeben. Die Kugel leitet dann die Kräfte an die äußere Schale weiter, die mit dem Rahmen verbunden ist. Die Kräfte, die dabei gewirkt haben, sind für die Kugelabdrücke in den Laufbahnen verantwortlich. Zur Berechnung der theoretisch wirkenden Kraft werden die Durchmesser der Abdrücke vermessen. Die Abdrücke werden an 3 repräsentativen Schalen ermittelt. Bei einer dieser Schalen ist eine Vermessung unter der Annahme, dass die Lagerschalen eine Härte von 45 HBS (nach Brinell) aufweisen leider nicht möglich. Durch umstellen der Gleichung (Härteberechnung nach Brinell) wird die theoretisch wirkende Kraft berechnet (Anhang 14.2 Kugeleindruckkräfte).

### 3.4 Experimentelle Spannungsanalyse nach dem Reißlackverfahren

Zur schnellen Bestimmung von Dehnungskonzentrationen bzw. Hauptspannungsrichtungen an der Bauteiloberfläche wird Reißlack verwendet; ausgenutzt wird dabei das spröde Verhalten unter Zugspannung. Nach dem Aufbringen auf die Bauteiloberfläche, welches meist im Gießverfahren geschieht, muss der Reißlack aushärten. Beim überschreiten bestimmter Dehnungs-/ Stauchungswerte treten senkrecht zur Dehnung/ Stauchung Risse auf. Aus dem Abstand und dem Verlauf der Risslinien erhält man qualitative (Bestimmung der Hauptspannungsrichtungen) und quantitative (Bestimmung der Spannungsgröße) Informationen über die Bauteilbeanspruchung der Oberfläche. Um quantitative Aussagen über die Anreißschwelle treffen zu können, müsste ein Kalibrierversuch (Biegestab) durchgeführt werden. Dabei müsste der Lack sowohl auf der Probeapplikation als auch beim Versuch den gleichen Bedingungen ausgesetzt werden. Darauf wird bei dieser Arbeit verzichtet, da mit dem Verfahren nur qualitative Aussagen über die Bereiche der größten Spannung getroffen werden sollen. Zu Anwendung kam das Verfahren bei einem Stahlrahmen.

#### 3.4.1 Prinzip des Reißlackverfahrens

Wird ein Bauteil mit einem sehr spröden, fest an der Oberfläche haftenden Stoff beschichtet (der wesentlich geringere Festigkeitseigenschaften hat als das Bauteil), reißt bei der Aufbringung äußerer Kräfte infolge der Dehnung dieser Überzug auf. Bei spröden Werkstoffen erfolgt ein Bruch meist als Trennungsbruch, wobei die Risse im Überzug senkrecht zur größten Dehnung auftreten (Abbildung 15). Werden hingegen im Überzug geordnete Risse sichtbar, so kann die Aussage getroffen werden, dass senkrecht zu den Rissen im Bauteil die höchsten positiven Dehnungen vorhanden sind. Diese Richtung, senkrecht zu den aufgetretenen Rissen, entspricht also immer der Richtung der ersten Hauptspannung  $\sigma_{11}$ . Auf der anderen Seite muss die Richtung der zweiten Hauptspannung  $\sigma_{22}$  stets parallel zu den auftretenden Rissen verlaufen. Über die Größe der im Bauteil herrschenden



Spannungen können zunächst keinerlei Angaben gemacht werden. Wichtig ist die Feststellung der Hauptspannungsrichtungen, damit mit Hilfe von Feindehnungsmessern die Hauptspannung unmittelbar gemessen werden kann [Experimentelle Methoden zur Spannungsanalyse 2009].

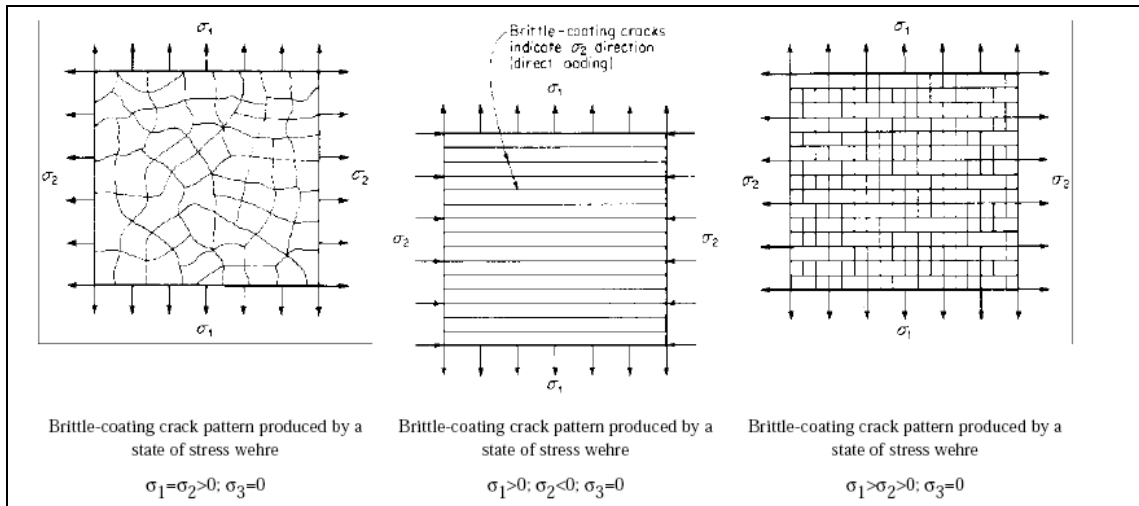


Abbildung 15 Rissmuster in belasteten Platten [Experimentelle Methoden zur Spannungsanalyse 2009]

Alle Dehnlinienvverfahren beruhen auf diesem Arbeitsprinzip, wobei die verschiedenartigsten Überzugstoffe verwendet werden. Dies hat hinsichtlich der Verfahrenstechnik beträchtliche Unterschiede zur Folge.

Bei allen Versuchen, bei denen die Möglichkeit besteht mit Feindehnungsmessern die Spannung zu bestimmen, wird das billige Maybach-Verfahren anderen Methoden vorgezogen. Maybach-Lack besteht aus einer Mischung von 7 Teilen Kolophonium und 3 Teilen Dammar-Harz; beides sind Naturharze von größerem Reinheitsgrad. Das Gemisch wird auf das gesäuberte Bauteil bei etwa 150°C aufgetragen [Experimentelle Methoden zur Spannungsanalyse 2009].

### 3.4.2 Lackierung

Für die Lackierung muss das Bauteil vollständig gesäubert und mit einem Lösungsmittel (z.B. Isopropanol-Alkohol) nachbehandelt werden. Außerdem muss es betriebsfertig in der Vorrichtung eingespannt sein, damit unmittelbar nach dem Auftragen des Lackes belastet werden kann. Der Rahmen wird mit einer reinen Flamme (Propangasbrenner) auf 120...130°C

vorgewärmt, die richtige Temperatur wird mittels eines Infrarotthermometers ermittelt. Danach wird der Maybach-Lack in Stangen- oder Pulverform auf die Oberfläche aufgebracht. Ist die Bauteiltemperatur im korrekten Bereich kann mittels Spatel eine optimale flächige Verteilung vorgenommen werden. Die Dicke der Schicht sollte sich zwischen 200 und 300µm befinden. Mit einem Heißluftgebläse sind Korrekturen während des Erkaltingsprozesses möglich. Der Reißlack kann durch erneutes Erwärmen nach einer Beanspruchung wieder in den Ursprungszustand zurück versetzt werden. Auf diese Weise lassen sich kleine Haarrisse, die evtl. vor dem tatsächlichen Versuch entstanden sind, wieder entfernen.

### 3.4.3 Belastung des Bauteils

Um eine möglichst gleichmäßige Abkühlung von Rahmen und Lack zu erreichen, werden die größeren Wanddicken zuerst lackiert. Die optimale Belastungstemperatur liegt je nach Zusammensetzung des Lackes zwischen 15°C und 30°C. Die Belastung muss spätestens dann erfolgen, wenn der erste Krakelationsriss auftritt. Bei zu früher Belastung ist der Lack noch zu zäh und würde sich plastisch verformen [Experimentelle Methoden zur Spannungsanalyse 2009]. Eine Entlastung des Rahmes nach dem Abkühlen führt zu Entlastungsrissen, die genau senkrecht zu den eigentlichen Dehnlinien liegen.

### 3.4.4 Aufreißen der Dehnlinien

Die Risse in der Lackschicht entstehen durch Überschreiten der Trennfestigkeit. Wird diese Trennfestigkeit durch Eigenspannungen im Lack überschritten, so treten die Risse ungeordnet auf und der Lack krakeliert. Wird unmittelbar vor dem Krakelieren eine Belastung auf das Bauteil aufgebracht, so genügen bereits kleinste Beanspruchungen, um die Trennfestigkeit des Lackes zu überschreiten. Der Lack reißt senkrecht zu der größten positiven Dehnung des Bauteils auf. Die Empfindlichkeit des Lackes ist so groß, dass selbst bei einachsigen Druckspannungszuständen im Bauteil der Lack aufgrund der positiven Querdehnung anspricht. Daher

sollte die Lackeigenspannung möglichst groß sein um nahe an der Trennfestigkeit zu bleiben.

Unmittelbar vor Erreichen der Trennfestigkeit genügen oft kleine Störungen, um den Lack flächenhaft aufreißen zu lassen. Wegen dieser Eigenart des Lackes können keine Rückschlüsse auf die Größe der Spannungen bezogen werden. Erste Risse treten bei Dehnungen von  $0,1 \mu\text{m}/\text{mm}$  auf; bei Stahl entspricht das Spannungen von 1 bis  $2 \text{ N}/\text{mm}^2$ . Die Lackempfindlichkeit nimmt mit zunehmender Eigenspannung zu. Die Eigenspannungen entstehen hauptsächlich durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Bauteil und Lackschicht. Dem Entstehen der Eigenspannungen wirkt das Kriechverhalten des Lackes entgegen und ist bei fast allen Harzen zu beobachten [Experimentelle Methoden zur Spannungsanalyse 2009]. Es wird vom „Spannungsabbau unter Last“ gesprochen, da mit abnehmender Zähigkeit, abhängig vom Harztyp und der Temperatur, die Kriechgeschwindigkeit sinkt. Belastet man den mit Dehnlinienlack überzogenen Rahmen bereits bei höheren Temperaturen, so würde die Lackschicht schnell die Eigenspannungen abbauen. Da ein Test meist unmittelbar nach dem Auftragen durchgeführt wird, ist der Luftfeuchtigkeitseinfluss vernachlässigbar. Würden einige Stunden zwischen dem Auftragen und der Prüfung vergehen, würde sich der Einfluss der Luftfeuchtigkeit bemerkbar machen.



Abbildung 16 Risslinien auf Proberahmen  
[velotech.de 2010]



Abbildung 17 Querrisse [velotech.de 2010]

Die Lackrisse liegen meist dicht nebeneinander und werden oft erst durch betrachten aus verschiedenen Blickwinkeln sichtbar. Um alle Risse sehen zu können, muss der Lack aus verschiedenen Winkeln beleuchtet werden; die

Reflexion und der Schattenwurf an den Bruchkanten macht die Risse sichtbar. In Abbildung 16 sind Risslinien am Unterrohr nach einer frontalen Belastung zu erkennen. An der hellen Stelle (rote Markierung) ist wahrscheinlich der Bereich der größten Dehnung; hier verformt sich das Material am meisten. In Abbildung 17 ist zu sehen, dass es am Oberrohr zu Querlinienfeldern gekommen ist. Diese liegen  $90^\circ$  versetzt zur Belastungsrichtung. Das Rahmenrohr wurde demnach auf Zug beansprucht.

### 3.4.5 Dehnlinienvelder

Die durch Belastung entstandenen Lackrisse sind Trennungsbrüche und liegen quer zu den größten Dehnungen. Bei einer Zugbeanspruchung treten ringförmige, um die Probe herumlaufende Risse auf. Bei einer Druckbeanspruchung treten meist keine oder nur in Richtung der Druckspannung liegende Risse auf; Ursache ist hier eine Querdehnung.

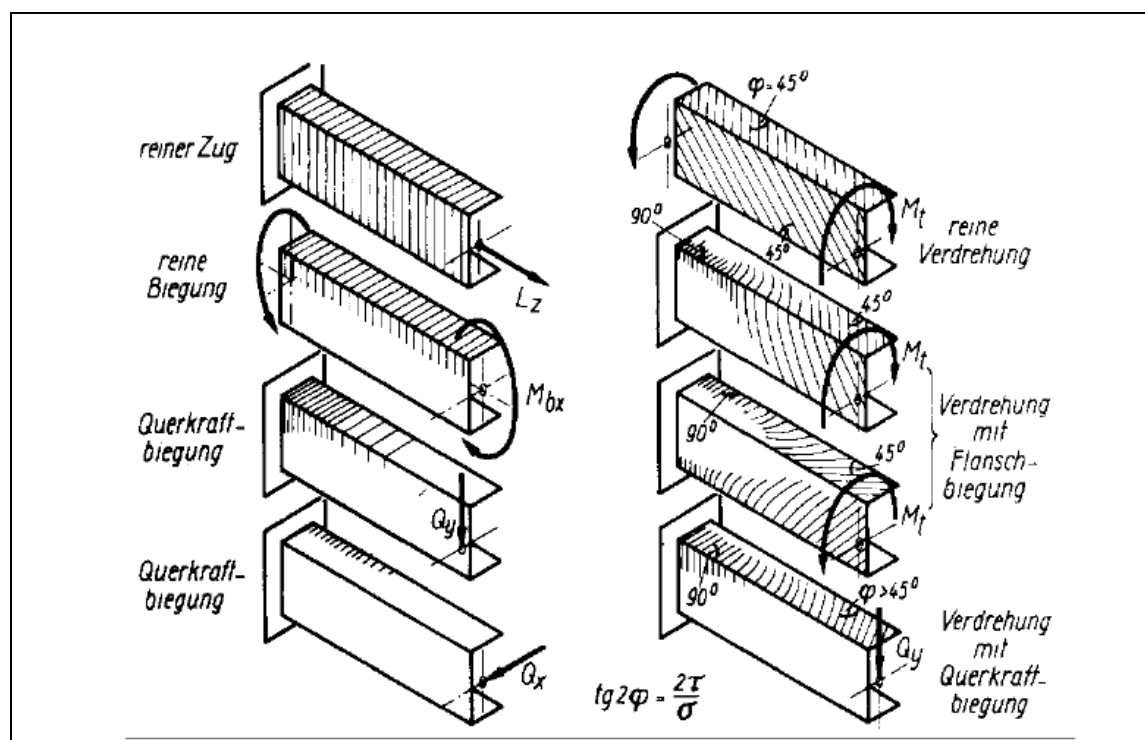


Abbildung 18 Belastungsfälle [Experimentelle Methoden zur Spannungsanalyse 2009]

In Abbildung 18 sind unterschiedliche Zugbelastungen und deren resultierende Rissbildungen dargestellt.

### 3.5 Grundlagen der Dehnmessstreifen-Technologie

Dehnmessstreifen (DMS) werden zur experimentellen Spannungsanalyse eingesetzt, aus deren Dehnungen die mechanischen Spannungen im Messobjekt ermittelt werden können. Über diese Dehnung der DMS können Rückschlüsse auf die Spannungen gezogen werden. Der Zusammenhang zwischen Verformungen und Spannungen in einem Bauteil ist durch die gültigen Stoffgesetze gegeben, die für dessen Werkstoff und Beanspruchungszustand gelten. Bei einem DMS handelt es sich im Wesentlichen um einen Ohm'schen Widerstand. Er ist aus einem Trägerstoff und einer Leiterschleife hergestellt, die mit zwei Spannungsanschlüssen ausgestattet ist. Die zu messende mechanische Größe *Dehnung* erzeugt im Dehnmessstreifen eine Widerstandsänderung, die die Ausgangsspannung der Wheatstone'schen Brückenschaltung ändert. Die Wheatstone'sche Brückenschaltung bietet ausgezeichnete Möglichkeiten, Auswirkungen von unerwünschten Einflüssen (z.B. Temperaturänderungen) weitgehend zu kompensieren.

#### 3.5.1 Aufbau

Folien-Dehnmessstreifen, wie sie heute großserientechnisch hergestellt werden, bestehen aus einer Kunststoffträgerfolie (ca. 25  $\mu\text{m}$ ), auf deren Oberfläche eine metallische Messgitterfolie (ca. 5  $\mu\text{m}$ ) aufgebracht ist. Die Oberseite des Messgitters wird durch eine ca. 12  $\mu\text{m}$  dicke Abdeckschicht geschützt.

#### 3.5.2 Funktionsweise und Befestigung

Mit dem DMS soll die in Längsrichtung seines Messgitters auftretende mechanische Dehnung gemessen werden. Diese Dehnung erzeugt eine Widerstandsänderung im Messgitter des DMS und somit eine messbare Veränderung der elektrischen Schaltung, in der sich der DMS befindet. Dehnungen und damit Widerstandsänderungen können allerdings auch eine andere Ursache haben. Neben der gewollten mechanischen Dehnung sind vor allem thermische Einflüsse und Kriecherscheinungen

Haupteinflussfaktoren für auftretende Widerstandsänderungen. Der Querdehnungseinfluss hat nur auf Präzisionsmessungen einen Einfluss; im Aufnehmerbau wird durch Kalibriermaßnahmen der Querdehnungseinfluss bedeutungslos.

Dehnmessstreifen nehmen die in der Oberfläche des Messobjektes und somit die an der Installationsfläche auftretende Dehnung auf. Treten Dehnungsgradienten längs der Messgitterachsen des DMS im Messobjekt auf, so nimmt der DMS den Mittelwert der im Bereich der aktiven Messgitterlänge auftretenden Dehnung auf. Das integrierende Erfassen des Dehnungsverlaufes ist über die aktive Messgitterlänge des DMS möglich. Je kleiner der Abstand zwischen den Windungen des DMS ist, desto feiner sind die Integrations-Ergebnisse, umso wirklichkeitsgetreuer kann der Dehnungsverlauf erfasst werden. Jeder Dehnmessstreifen liefert den arithmetischen Mittelwert der Dehnung in dem von seinem aktiven Messgitter abgedeckten Oberflächenbereich (Anhang 14.8).

Für die Befestigung werden verschiedene Methoden angewandt. Der DMS kann auf einem Trägerblech befestigt, angeschweißt oder mittels Klebstoff am Messobjekt befestigt werden. In einigen Anwendungsbereichen werden auch in Kunststoff eingebettete bzw. gekapselte DMS verwendet. Diese können dann in aushärtende flüssige Werkstoffe (z.B. Beton) eingegossen werden, um Messungen durchführen zu können. In den vorliegenden Fällen werden die DMS mittels Klebstoff am Prüfling befestigt. Der verwendete Klebstoff ist ein polymerisierender kalthärtender Einkomponentenklebstoff (Cyanoacrylat). Diese Klebstoffe sind sehr dünnflüssig und härten in weniger als einer Minute in einer sehr dünnen Schicht ( $<10\text{ }\mu\text{m}$ ) aus. Cyanoacrylate sind mit fast allen Metallen und Kunststoffen verträglich. Weil der Klebstoff nur in dünnen Schichten vollkommen aushärten kann, darf die Kontaktfläche nicht angeraut sein. Eine vorherige Reinigung der Kontaktflächen ist unbedingt erforderlich. Die schnelle Aushärtengeschwindigkeit von unter einer Minute setzt eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit und eine gute Zugänglichkeit der Bearbeitungszone voraus. Der DMS klebt sofort nach dem ersten Kontakt mit der Klebschicht unverrückbar fest, sodass eine spätere Lagekorrektur unmöglich ist. Nach der Befestigung des Dehnmessstreifens und dem Verlöten der Kontakte wird

die Messstelle mit einem Schutz versehen. Die Art und der Umfang des Schutzes sind von der Anwendung und den physikalischen und chemischen Einwirkungen abhängig. Die Schutzmittel reichen von Lacken bis hin zu umfangreichen Ummantelungen, die die Messstelle beispielsweise vor hohen Temperaturschwankungen schützen. Für die vorliegende Messaufgabe ist eine Beschichtung mit Schutzlack ausreichend.

Während und nach der Installation sind Funktionstests an der Messstelle sinnvoll. Eine empfohlene Prüfung bei der Installation ist der sog. „Radiergummitest“; dieser Test wird bei einem geklebten und verdrahteten DMS vor der Abdeckung durchgeführt. Dabei wird mit einem Radiergummi kräftig senkrecht von oben auf den Dehnmessstreifen gedrückt und gleichzeitig die Anzeige des Messgerätes beobachtet. Der limitierende Faktor für die Druckkraft ist das zu untersuchende Material, welches nicht beschädigt werden darf. Nach dem Drücken muss die Anzeige des Messgerätes wieder auf Null zurückgehen. Ist eine Abweichung von mehr als  $2\ \mu\text{m}/\text{mm}$  vorhanden, deutet dies auf Mängel in der Klebung hin. Das Messgitter könnte sich durch Unebenheiten in der Klebeschicht oder im Untergrund eingedrückt haben. (Die Messstelle muss erneuert werden.)

### 3.5.3 Messgitterwerkstoffe

Die Anforderungen an die Messgitterwerkstoffe sind vielseitig. Diese reichen von hoher Dehnbarkeit über hohe Dauerschwingfestigkeit bis hin zu guter Verarbeitbarkeit. Ebenso sollte ein breiter Temperatur Anwendungsbereich gegeben sein. Einer der universellsten Messgitterwerkstoffe ist Konstantan. Es besitzt einen breiten Temperatur Anwendungsbereich ( $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $+180^{\circ}\text{C}$ ) und eine kleine Dehnungsempfindlichkeit ( $k \approx 2$ ). Die Legierung besteht aus 50 – 60 % Kupfer [Cu] und 40 – 50 % Nickel [Ni]. [Keil 1995] Ein Großteil der Messanwendungen wird mit Hilfe von DMS durchgeführt, die aus Konstantan, welches auch hier verwendet wird, gefertigt sind. In Tabelle 1 sind einige Messgittermaterialien mit ihren Zusammensetzungen aufgeführt [Hoffmann 1987].

Tabelle 1 Messgitterwerkstoffe

Messgitterwerkstoff (Handelsnamen)	Richtanalyse [%]	mittlerer $k$ -Faktor ca.
Konstantan	50-60 Cu, 40-50 Ni	2,05
Karma	73 Ni, 20 Cr, Rest Fe + Al	2,1
Ni Chrome V	80 Ni, 20 Cr	2,2
Platin- Wolfram	92 Pt, 8 W	4,0

[Hoffmann 1987]

### 3.5.4 Dehnungsempfindlichkeit

Unter der Dehnungsempfindlichkeit eines DMS wird das Verhältnis der beobachteten Ausgangsgröße zu der sie verursachenden Eingangsgröße verstanden. Die Dehnung  $\varepsilon$  stellt den wahren Dehnungswert des aufgenommenen DMS dar. Die Ausgangsgröße wird als Widerstandsänderung  $dR/R$  gemessen [Keil 1995]. Der Zusammenhang der beiden Größen wird über den  $k$ -Faktor beschrieben.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{k} \quad (\text{Gl. 3.0})$$

$$\frac{dR}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (\text{Gl. 3.1})$$

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = \kappa(1 - 2\nu) + (1 + 2\nu) \quad (\text{Gl. 3.2})$$

mit:

 $\varepsilon$  Dehnung $k$   $k$ -Faktor $\nu$  Querdehnungszahl $l$  Ausgangslänge des Körpers $\kappa$  Proportionalitätsfaktor $R$  Widerstand des DMS

Im Wesentlichen wird der  $k$ -Faktor durch zwei physikalische Vorgänge bestimmt:

- durch Geometrieänderungen des Leiters, die Einfluss auf den Widerstand haben,
- und durch Volumenänderungen bei elastischer Verformung.



Der k-Faktor von Messgitterwerkstoffen und des damit gefertigten DMS weichen voneinander ab, da Herstellungseinflüsse, wie Wärmebehandlung, Formgebung und Trägerwerkstoff, den k-Faktor beeinflussen. Selbst zwischen unterschiedlichen Fertigungschargen eines gleichen DMS-Typs gibt es Unterschiede, die der Hersteller auf einem Datenblatt angibt. Die Toleranzen bei normalen Folien-DMS betragen 1 %.

Durch die Querdehnung wird ebenfalls der Widerstand des DMS beeinflusst; die Definition der Querempfindlichkeit  $q$  wird in Gleichung 3.3 definiert.

$$q = \frac{k_q}{k_l} \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Der durch die Querdehnung auftretende Fehler lässt sich durch die Gleichung 3.4 ermitteln<sup>2</sup>.

$$f = \frac{q}{1 - qv_0} \cdot \left( v_0 + \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} \right) \quad (\text{Gl. 3.4})$$

mit:

$k_q$ Empfindlichkeit gegen Querdehnung	$q$ Querempfindlichkeit
$\varepsilon_q$ Querdehnung	$v$ Querdehnungszahl
$\varepsilon_l$ Längsdehnung	$f$ relativer Fehler
$k_l$ Empfindlichkeit gegen Längsdehnung	

### 3.5.5 Elektrische Belastbarkeit

Ein DMS ist im Wesentlichen nur ein Strom durchflossener elektrischer Widerstand. Durch die hohe Stromdichte wird viel Energie ( $E_{\text{wärme}} = U \cdot I \cdot t$ ) in Wärme umgewandelt. Bei einer symmetrischen Brückenschaltung mit einer Spannung von 5 V und Messgitterwiderständen mit je 120  $\Omega$ , fließt ein Strom von 20,8 mA. Bezieht man diesen Strom auf den Leiterbahnquerschnitt, ergibt sich eine für die Starkstromtechnik unvorstellbar große Stromdichte von 46 A/mm<sup>2</sup>. Nur durch das bei kleinen Leiterquerschnitten sehr günstige Verhältnis von Querschnittsfläche zu

<sup>2</sup>Herleitung siehe [Keil 1995]

Mantelfläche ist es möglich, die durch den Stromfluss entstehende Joulsche Wärme an die Umgebung abzugeben [Hoffmann 1987]. Damit dies gewährleistet werden kann, muss die Temperaturerhöhung am DMS in vertretbaren Grenzen gehalten werden. Die beeinflussenden Parameter hierbei sind:

- die Höhe der Brückenspeisespannung,
- der elektrische Widerstand des Messgitters,
- die Größe und Geometrie des DMS-Gitters,
- die Umgebungstemperaturen,
- die Wärmeleitfähigkeit des Bauteils und
- die Wärmekapazität und das Abstrahl- bzw. Kühlvermögen des Bauteils.

Aus einer elektrischen Überbelastung des Messgitters können ähnliche Effekte, wie bei zu hohen Umgebungstemperaturen, entstehen. Die Speisespannung  $U$  und Leistung  $P$  stehen in einer quadratischen Abhängigkeit zueinander (Gleichung 3.5).

$$P = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} \quad (\text{Gl. 3.5})$$

$$E = P \cdot t \quad (\text{Gl. 3.6})$$

mit:

$P$  Leistung

$I$  Speisestrom

$U$  Speisespannung

$t$  Zeit

$R$  Widerstand

Je größer die Temperaturänderung des messenden DMS, desto größer ist die Widerstandsänderung und damit der Messfehler. Um die Messabweichungen so gering wie möglich zu halten, muss die entstandene Wärmeenergie vom Messobjekt möglichst gut aufgenommen werden. Holz und Glas sind schlechte Wärmeleiter, weshalb die so genannte „scheinbare Dehnung durch Erwärmung“ auftritt. Bei Messobjekten aus Stahl oder Aluminium kann dieser Einfluss vernachlässigt werden, da eine besonders gute Wärmeleitung vorliegt. Bei einer Wheatstone'schen-Brückenschaltung

liegt bei einer Speisespannung  $U_E$  am einzelnen DMS eine Spannung von  $U_E/2$  an. Wird  $U_E/2$  in die Gleichung 3.6 eingesetzt, errechnet sich die Leistung aus:

$$P = \frac{U_E^2}{4R} \quad (\text{Gl. 3.7})$$

Wird ein  $120\ \Omega$ -DMS in einer Brückenspannung mit  $5\ \text{V}$  gespeist, so ergibt sich eine Wärmeenergie von  $0,052\ \text{Ws}$ . Wird stattdessen ein  $350\ \Omega$ -DMS eingesetzt, so ergibt sich eine Wärmeenergie von lediglich  $0,018\ \text{Ws}$ . Die abzuführende Wärmemenge reduziert sich also mit steigendem Widerstand des DMS [Keil 1995]. Ein weiterer nicht unerheblicher Vorteil (von großen Widerständen) ist eine geringere Leistungsaufnahme während der Anwendung und damit eine längere Standzeit der Batterien.

### 3.5.6 Verkabelung und Schaltungsaufbau

Die Widerstandsänderungen der DMS können mit Hilfe einer Brückenschaltung erfasst werden. Die nach Wheatstone benannte Schaltung hat die Besonderheit, dass die Differenz zwischen der eingespeisten Spannung und der Ausgangsspannung von den Widerstandsverhältnissen innerhalb der Brücke abhängig ist.

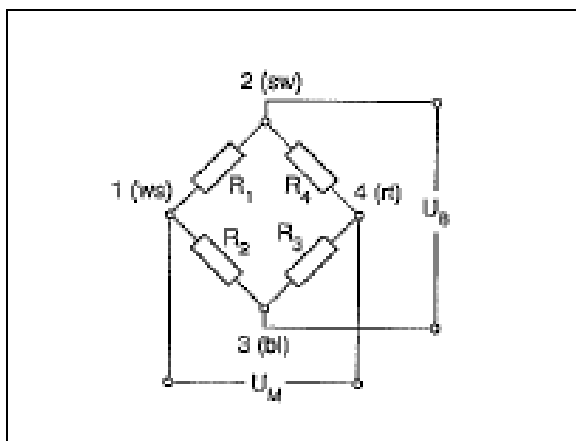


Abbildung 19 Wheatstone Vollbrücke mit 4 Widerständen [Hoffmann 1987]

Die vier Arme der Brücke werden durch die Widerstände  $R_1$  bis  $R_4$  gebildet (Abbildung 19). An den Eckpunkten von  $R_1$  &  $R_4$  und  $R_2$  &  $R_3$  wird die Speisespannung  $U_E$  angelegt; an den beiden freien Punkten liegt die

Messspannung  $U_A$  an. Der Wert der Spannung  $U_A$  ist abhängig vom Verhältnis der Widerstände  $R_1/R_2$  und  $R_4/R_3$ .

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4} \equiv \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)} \quad (\text{Gl. 3.8})$$

Ändern sich die Widerstände  $R_1$  bis  $R_4$  in ihrem Wert aufgrund von Verformungen, tritt am Ausgang die Spannung  $U_A$  auf. Es gilt weiterhin die Beziehung aus Gleichung 3.8:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (\text{Gl. 3.9})$$

Nach Integration der Gleichung 3.1 ergibt sich:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (\text{Gl. 3.10})$$

In der Wheatstone'schen Brücke sind die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  gleich dimensioniert. Gleiches gilt für  $R_3$  und  $R_4$ . Deshalb definiert man:

$$R_1 = R_2 \quad (\text{Gl. 3.11})$$

und äquivalent:

$$R_3 = R_4 \quad (\text{Gl. 3.12})$$

Für Messungen ist es ausreichend wenn die in Reihe geschalteten DMS gleich sind. Es besteht die Möglichkeit der Zusammenschaltung einer 120  $\Omega$  Halbbrücke und einer 350  $\Omega$  Halbbrücke [Hoffmann 1987].

### 3.6 Arten von Brückenschaltungen

In der Spannungsanalyse ist es sinnvoll mit Vollbrücken- oder Halbbrückenschaltungen zu arbeiten, da diese Schaltungen selbstkompensierend sind und Störeinflüsse verschiedener Art eliminiert werden können.

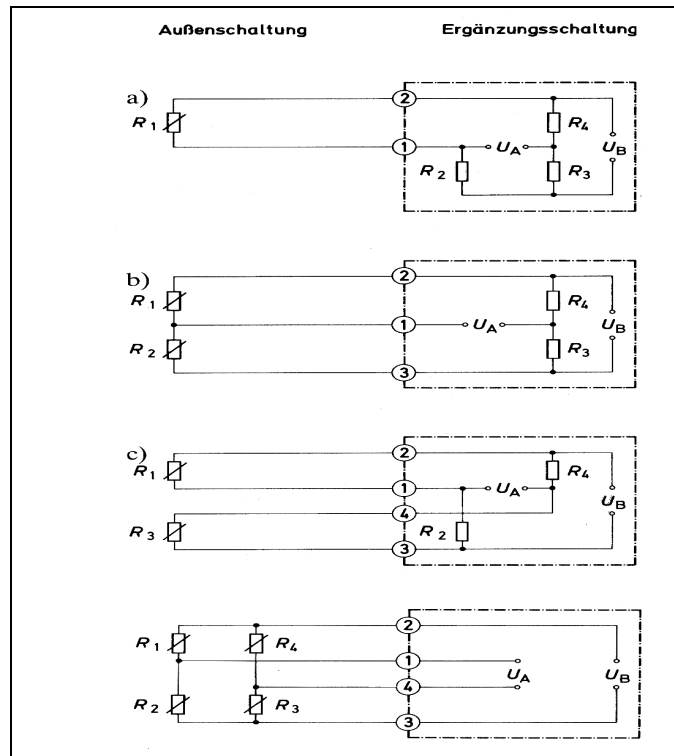


Abbildung 20 Anwendungsformen der Wheatstone'schen Brückenschaltung in der DMS-Technik [Hoffmann 1987]; a) Viertelbrücke, b) Halbbrücke, c) Zweiviertel- oder Diagonalbrücke, d) Vollbrücke

Unabhängig von der Art der benutzten Schaltung handelt es sich im eigentlichen Sinn immer um eine Vollbrücke. Die Brücke wird je nach Art der Schaltung komplett von DMS (veränderbarer Widerstand) gebildet oder der fehlende Teil wird von Festwiderständen im Messverstärker ergänzt (Abbildung 20).

### 3.6.1 Messung am Zugstab

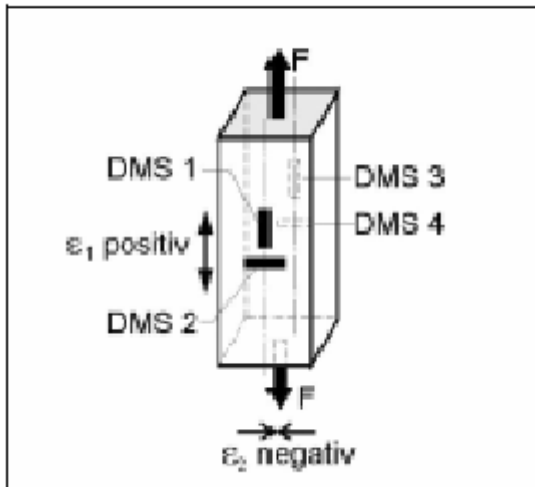


Abbildung 21 Zugstab mit Messtechnik  
[Hoffmann 1987]

Beim Zugstab (Abbildung 21) entsteht die Kraftwirkung in Längsrichtung mit der Dehnung  $\varepsilon_1$ . In Querrichtung entsteht die negative Querdehnung  $\varepsilon_2$ . Bei einem Zugstab ändern sich die Richtungen der beiden Dehnungen und damit deren Vorzeichen.

Für die Längsdehnung  $\varepsilon_1$  gilt die Beziehung:

$$\varepsilon_1 = \frac{F}{A \cdot E} \quad (\text{Gl. 3.13})$$

Für die Querdehnung gilt:

$$\varepsilon_2 = -\nu \cdot \varepsilon_1 = -\nu \frac{F}{A \cdot E} \quad (\text{Gl.3.14})$$

mit:

$F$  Kraft       $A$  Fläche       $E$  elektrische Feldstärke  
 $\nu$  Poissonzahl

Daraus ergibt sich für DMS 1 eine Widerstandsänderung von

$$\Delta R_1 = \varepsilon_1 \cdot k \cdot R_1 \quad (\text{Gl.3.15})$$

für DMS 2 wird

$$\Delta R_2 = -\nu \cdot \varepsilon_1 \cdot k \cdot R_2 \quad (\text{Gl.3.16})$$

Entsprechendes gilt für die DMS 3 und 4 [Hoffmann 1987].

Die Querdehnungs- oder Poissonzahl  $\nu$  (Metalle  $\nu \approx 0,3$ ) ist werkstoffabhängig und gilt nur im elastischen Verformungsbereich. Werden die DMS in Reihenfolge ihrer Indizes zu einer Vollbrücke geschaltet, so ergibt sich ein Messsignal von:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - (-\varepsilon_1) + \varepsilon_3 - (-\nu \cdot \varepsilon_3)) \quad (\text{Gl. 3.17})$$

Mit  $\nu \approx 0,3$  und  $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$  und  $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 \approx -0,3 \cdot \varepsilon$  ergibt sich das Gesamtsignal aus Gleichung 3.17 :

$$\frac{U_A}{U_E} \approx \frac{k}{4} \cdot \varepsilon_1 \cdot 2,6 \quad (\text{Gl. 3.18})$$

Die DMS-Schaltung in Vollbrücke bringt ein 2,6 fach größeres Signal der Dehnung  $\varepsilon_1$  in Hauptbeanspruchungsrichtung des Zugstabes. Dieser Faktor wird auch als Brückenfaktor (B) bezeichnet.

Für die Dehnung  $\varepsilon_1$  in der Hauptbeanspruchungsrichtung gilt nach Gleichung 3.18:

$$\varepsilon_1 = \frac{4}{B \cdot k} \cdot \frac{U_A}{U_E} \quad (\text{Gl. 3.19})$$

### 3.6.2 Messung am Biegestab

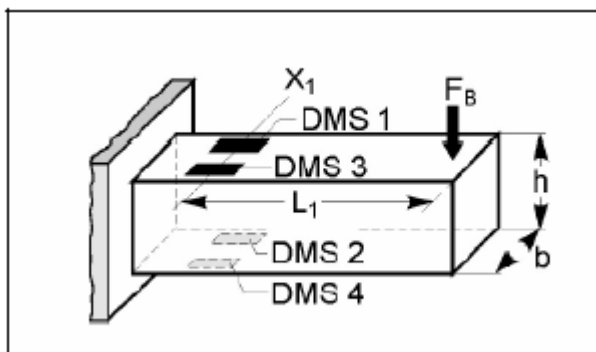


Abbildung 22 Biegestab mit Messtechnik [Hoffmann 1987]

Durch die Biegung (Abbildung 22) erfährt eine Seite des Stabes eine positive Dehnung und die gegenüberliegende Seite eine negative Dehnung. Bei spiegelsymmetrischem Querschnitt ist der Betrag beider Dehnungen gleich. Dadurch ergeben sich besonders günstige Bedingungen hinsichtlich der Addition der Messwerte.

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + \varepsilon_3 - (-\varepsilon_4) \quad \text{mit} \quad |\varepsilon_1| = |\varepsilon_2| = |\varepsilon_3| = |\varepsilon_4| \quad (\text{Gl. 3.20})$$

Aus Gleichung 3.20 ergibt sich für  $B=4$

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = k \cdot |\varepsilon| \quad \leadsto \quad |\varepsilon| = \frac{\frac{U_A}{U_E}}{k} \quad (\text{Gl. 3.21})$$

Die Messstellen an den Prüfrahen sind alle in Vollbrücke in Form des Biegestabes ausgeführt, um Momente und Dehnungen aufzunehmen.

### 3.7 Fehlerbetrachtung für DMS

Dehnungsmessstreifen sind sehr genaue Messmittel mit Fehlergrenzen von 0,02% und einer Konstanz der Kennwerte von 1/10000, sind bei einem hermetisch gekapselten Aufnehmer problemlos zu erreichen. Bei der Installation eines DMS ist mit hoher Sorgfalt und Sauberkeit vorzugehen. Fehler können sich in der Brückenschaltung durch elektrische Asymmetrien, Fertigungstoleranzen im Messobjekt, Richtungsfehler der DMS usw. bilden. Eine Fehlerbetrachtung sollte jeder Messung vorangehen und auch nach der Messung ausgeführt werden.



## 4 Prüftechnikstandard

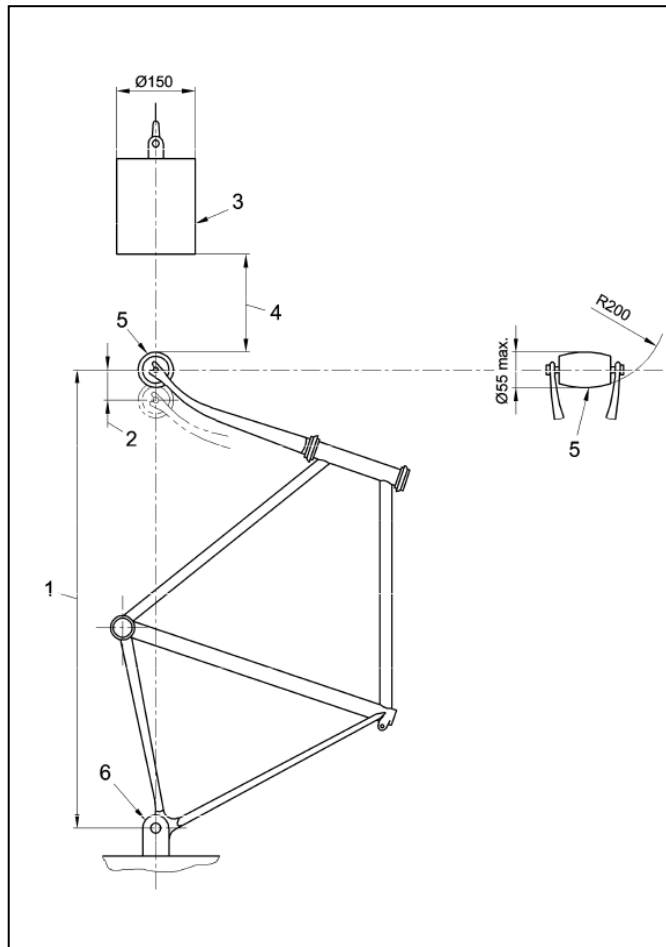
Die derzeit gültigen Prüfnormen geben Auskunft über den aktuellen Stand der Prüftechnik. Im Folgenden werden lediglich die Anforderungen und Prüfvorgaben der Normen genannt, die für die anzustrebende Untersuchung relevant sind.

Tabelle 2 Zusammenfassung der Normanforderungen

Bauteil	Beanspruchung	EN 14764	EN 14765	EN 14766	EN 14781
		City- und Trekking-Fahrräder	Kinderfahrrad	Geländefahrräder (Mountainbikes)	Rennräder
Rahmen – Gabeleinheit	dynamisch	1000 N schwellend in Pedaladapter 100.000 Schwingspiele		1200 N schwellend in Pedaladapter 100.000 Schwingspiele	1100 N schwellend in Pedaladapter 100.000 Schwingspiele
		1200 N schwellend in Satteladapter 50.000 Schwingsp.		Horizontale Stauchung und Streckung (+1200.. -600 N) 50.000 Lastspiele	horizontale Stauchung und Streckung (+600.. -600 N) 100.000 Lastspiele
				1200 N schwellend in Satteladapter 50.000 Schwingsp.	
	Stoß	40 J (22,5 kg aus 180 mm) parallel zur Aufstandsachse	27 J (22,5 kg aus 120 mm) parallel zur Aufstandsachse	80 J (22,5 kg aus 360 mm) parallel zur Aufstandsachse	47 J (22,5 kg aus 212 mm) parallel zur Aufstandsachse
			30 kg 75 mm oberhalb des Sattelrohrs fixiert	30 kg 75 mm oberhalb des Sattelrohrs, 10 kg auf dem Lenkkopf und 50 kg am Tretlager (Fallhöhe 300 mm)	30 kg 75 mm oberhalb des Sattelrohrs fixiert

In Tabelle 2 ist ein Ausschnitt der gültigen Normen aufgezeigt. Der Prüfaufbau und die Durchführung weichen kaum voneinander ab. Hinsichtlich der beaufschlagten Kräfte wird für jeden Fahrradtyp individuell

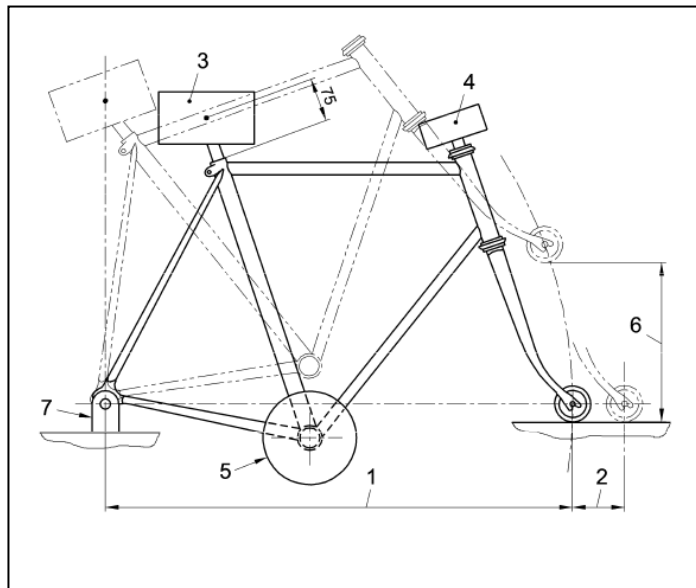
unterschieden. Um eine auf europäischer Ebene einheitliche Norm zu schaffen, wurde ausgehend von nationalen Normen, wie z.B. der DIN 79100, eine für alle europäischen Hersteller gültige Norm geschaffen. In den neu geschaffenen Normen wird genau so zwischen Erwachsenenfahrrädern (EN 14764) und Kinderrädern (EN 14765) unterschieden, wie es schon innerhalb der DIN 79100 geregelt war.

**Legende**

- 1 Radstand
- 2 bleibende Verformung
- 3 Gewicht von 22,5 kg
- 4 Fallhöhe 360 mm
- 5 Prüfrolle mit geringer Masse (max. 1 kg)
- 6 starre Befestigungsvorrichtung für die Hinterradaufnahme

Abbildung 23 Prüfaufbau der Stoßprüfung, Rahmen-Gabel-Einheit: Aufschlagprüfung  
[EN 14764]

In Abbildung 23 ist der Prüfaufbau der Stoßprüfung der Rahmen-Gabeleinheit dargestellt. Vordergründig ist die plastische Verformung der Bauteile zu sehen.

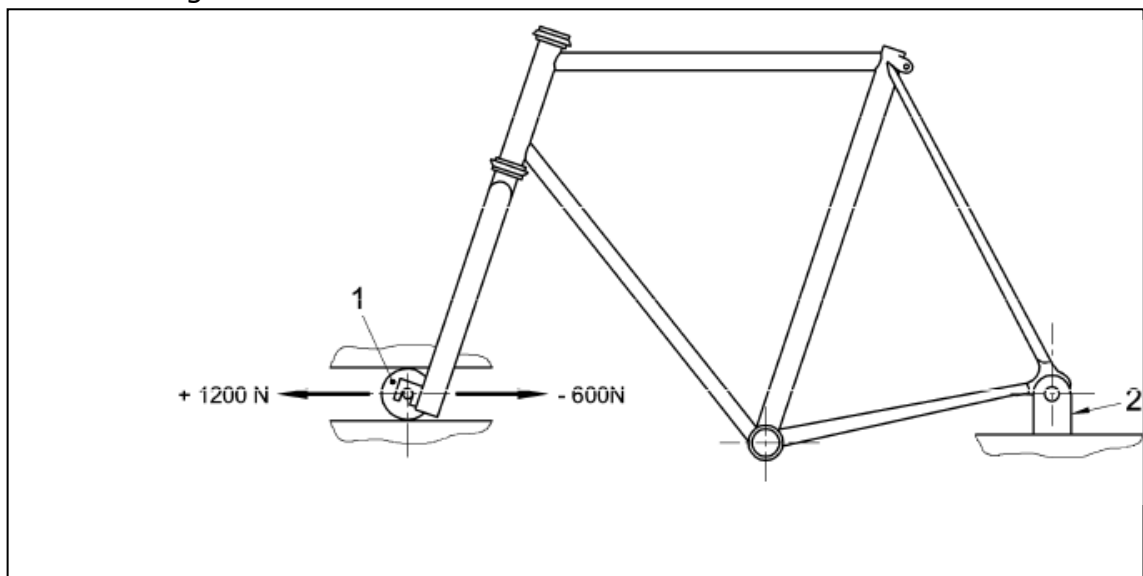


#### Legende

- 1 Radstand
- 2 bleibende Verformung
- 3 Masse von 30kg
- 4 Masse von 10kg
- 5 Masse von 50kg
- 6 Fallhöhe von 300mm
- 7 starre Befestigungsvorrichtung für die Hinterradaufnahme

Abbildung 24 Prüfaufbau der Stoßprüfung, Rahmen-Gabel-Einheit: Stoßprüfung (fallender Rahmen) [EN 14764]

Wie im Prüfversuch werden auch in den Abbildungen 24 und 25 die Veränderung des Radstandes betrachtet.



#### Legende

- 1 frei drehende geführte Prüfrolle
- 2 starre, drehbar gelagerte Halterung zur Aufnahme der hinteren Achse

Abbildung 25 dynamische Prüfung mit horizontalen Kräften [EN 14766]

Bei der Prüfung gemäß EN 14766 wird die Vorderradgabel dynamisch in horizontaler Richtung mit +1200 N nach vorn und mit -600 N nach hinten

belastet. Die Kräfte werden über die vorderen Ausfallenden in die Gabel eingeleitet. Die Beweglichkeit der Gabel in vertikale Richtung muss bei diesem Test eingeschränkt werden.

Bei allen Tests sollen Schwachstellen von Fahrradkonstruktionen aufgezeigt werden. Im Fall der Aufschlagprüfung gilt es, den Bezug zur Realität herzustellen und mit den gegebenen Messverfahren der Fa. velotech.de abzugleichen.

## 5 Rechnergestützte Untersuchung von Baugruppen

### 5.1 Erstellen von 3D CAD Modellen

Vor der eigentlichen Erstellung eines Modells wird der Rahmen vermessen, um alle relevanten Geometriedaten für das Modell zu erhalten. Im zweiten Schritt werden diese Daten mit Hilfe von SolidWorks zu einem 3-dimensionalen digitalen Abbild weiter verarbeitet. Ebenso wird der Rahmen modelliert.

Als Werkstoff wird ein einfacherer Stahl (S185) gewählt, wie es die Materialuntersuchungen ergeben haben (siehe 3.2.1). Auf eine Konifizierung der Rohre wird verzichtet. Um das Modell möglichst einfach zu gestalten, wird außerdem auf die gemuffte Konstruktion verzichtet. Wandungsdicken der einzelnen Rohre sowie deren Durchmesser werden vom Realmodell übernommen. Für nachfolgende Untersuchungen ist der Rahmen ausreichend detailliert konstruiert.

### 5.2 Vergleich der Spannungsanalyse

Der in SolidWorks konstruierte Rahmen wird mit dem integrierten Simulationsprogramm untersucht. Das Rahmenmodell wird durch die Finite Elemente Methode unterschiedlich belastet, um die Unterschiede zwischen den Testverfahren der DIN EN und der Fa. velotech.de aufzuzeigen. Die Prüfverfahren haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Rahmen. Die Spannungskonzentration befindet sich bei beiden Testverfahren an der Unterseite der Verbindungstelle von Steuerrohr und Unterrohr. Die Wirkrichtung der Kräfte ist gemäß des Koordinatensystems aus 2.2 festgelegt.

Die Vergleichsspannungen von Mises werden an 4 Punkten aufgenommen und verglichen. Das eingeleitete Drehmoment ist in beiden Testverfahren gleich groß.

$$M = F \cdot s \quad (\text{Gl. 5.1})$$

mit

$M$  Drehmoment [Nm]

$F$  Kraft [N]

$s$  Gabellänge [m]

Tabelle 3 Anliegende Momente an der Steuerrohrunterseite bei unterschiedlichen Gabellängen (Hebelwirkung)

Kraft [N]	Gabellänge [m]	Moment [Nm]
1200	0,384	460,8
	0,520	624
1500	0,384	576
	0,520	780
1800	0,384	691,2
	0,520	936

Bei einem Aufprall auf die Wand wird der Rahmen am Steuerrohr mit einem Moment belastet. Die Gabel ist dabei der wirkende Hebel. Je länger die Gabel ist, desto größer ist das wirkende Moment am Steuerrohr (bei gleicher Kraft an der Radnabe). Beim Aufprall auf das Hindernis „Wand“ wird die Gabel in Richtung Tretkurbelgehäuse gedrückt; die dazu notwendige Kraft wird beim Aufprall durch die Aufschlagenergie erzeugt. Je länger die Fahrradgabel ist, umso größer ist der wirkende Hebel am Steuerrohr. Da bei den zwei getesteten Fahrradtypen unterschiedlich lange Gabeln zum Einsatz kommen, ist auch die Belastung bei gleicher Stoßenergie unterschiedlich. In Tabelle 3 ist ein Vergleich der beiden Rahmentypen mit unterschiedlichen Wirkkräften dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch die um etwa 23% längere Gabel das Moment im Steuerrohrbereich um den gleichen Betrag steigt. Bei Fahrrädern mit langen Federgabeln, so wie sie z.B. im Downhill-Sport (Fahrradabfahrtssport im Gelände) eingesetzt werden, sind die Kräfte größer als bei einem Trekking oder Stadtfahrrad. Bei gleicher Aufschlaggeschwindigkeit und gleichem Systemgewicht (Fahrrad+Fahrer) wirken allein durch verschieden lange Gabeln unterschiedliche Kräfte auf den Rahmen. Bei der Konstruktion sollte

der spätere Einsatzbereich beachtet werden, damit die Rahmen belastungsgerecht dimensioniert sind.

### 5.3 Vergleich Stoßprüfung EN 14764 und Firma velotech.de

Nach der Erstellung eines Rahmenmodells in CAD wird dieses mit der FE-Methode untersucht. Die Simulation dient nur zur Darstellung der unterschiedlichen Verformungscharakteristiken, um einen theoretischen Vergleich zwischen den Prüfverfahren zu ermöglichen. Zur Berechnung werden die Modelle mit Volumenelementen berechnet; die zur Berechnung günstigeren Schalenelemente sind in CosmosXpress leider nicht konfigurierbar. Es muss der rechenintensivere Weg über die Volumenelemente durchgeführt werden. [Solid 2007]

#### 5.3.1 Test nach EN 14764

Bei der Prüfung nach Europannorm sind die Belastungen im vorderen Rahmendreieck am größten. Die Verformungen reichen bis in die Sitzstreben (Druckstrebe im normalen Betrieb) und in die Kettenstrebe (Zugstrebe im normalen Betrieb) hinein (siehe 26 Abbildung). Bei einer Überbelastung ist davon auszugehen, dass sich der Rahmen an den

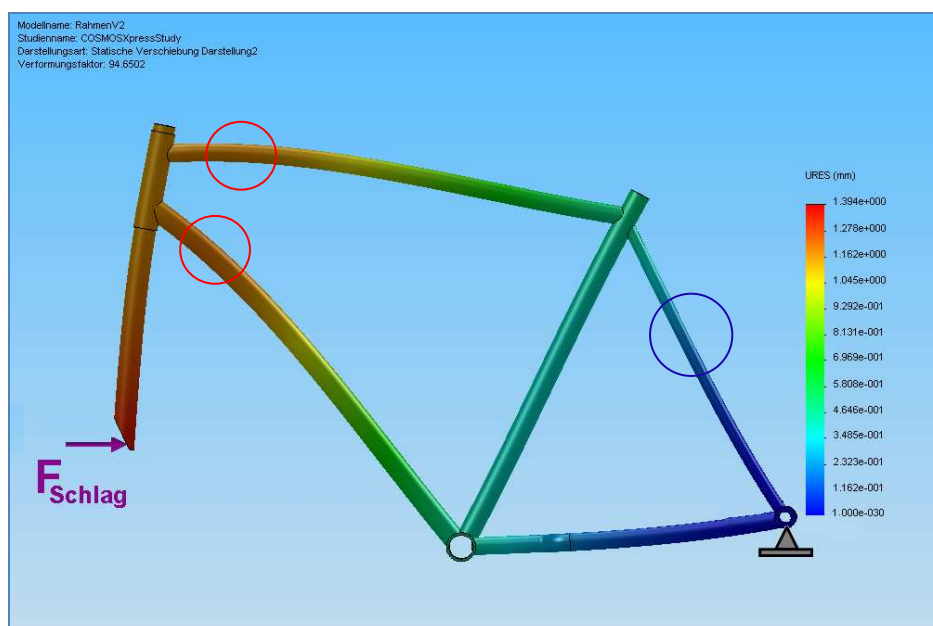


Abbildung 26 Stoßprüfung nach EN 14764 [velotech.de 2010]

rot markierten Bereichen elastisch oder bei Überbelastung dauerhaft verformt. Das entspricht auch den Werten in den zuvor untersuchten Rädern. Ein Verformen der Sitz- oder Kettenstrebe wird in der Praxis, z.B. bei einem Frontalaufprall, kaum auftreten. Beim Prüfverfahren nach Abbildung 26 wird das hintere Rahmendreieck ungünstig belastet. Die Verformung der hinteren Streben ist nach heutigen Rahmenkonstruktionen kritisch zu beurteilen (blaue Markierung). Moderne Fahrräder werden im Steuer- und Lenkbereich sehr steif ausgelegt, um ein präzises Lenkverhalten zu gewährleisten. Um dem Fahrer dennoch einen gewissen Komfort zu ermöglichen, werden konstruktive Tricks angewendet. Die Sitz- und Kettenstrebe werden sehr flach und breit ausgeführt. Somit gibt es einen „Flex“ in der Vertikalebene und das Fahrrad bleibt dennoch spurstief. Besonders bei Rennrädern sind die Verbindungen sehr filigran, um das Gewicht möglichst gering zu halten. Unter Voraussetzung gleicher Schlagenergien kann es zu Strukturproblemen an Stellen kommen, die eigentlich nicht getestet werden sollten. Es könnte beim Test unter Umständen der Hinterbau brechen. Dieser wäre aber bei einer normalen Fahrsituation nie diesen Lasten ausgesetzt gewesen.



### 5.3.2 Test nach Firma velotech.de

Beim Prüfverfahren der Fa. velotech.de (DIN plus) (Abbildung 27) wird der Rahmen am Tretlager befestigt. So sind beim Test beide Enden des Rahmens frei, wie es auch unter realen Bedingungen der Fall wäre.

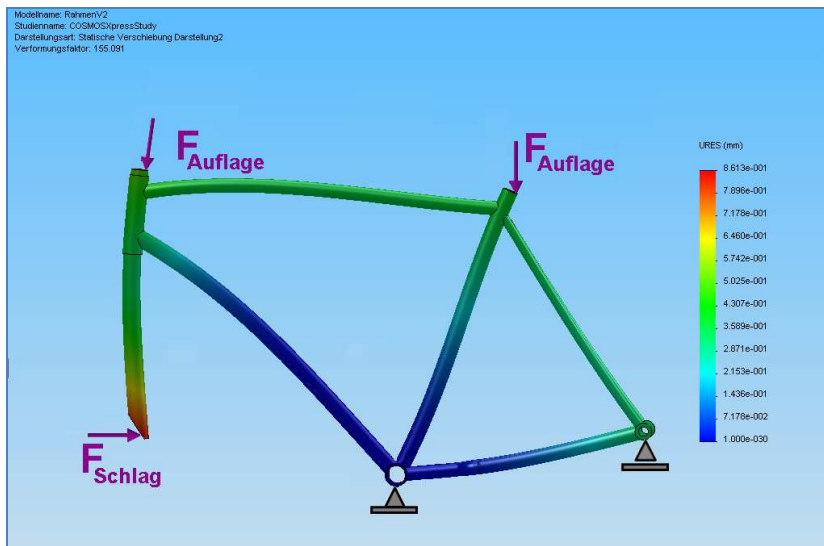


Abbildung 27  
 Stoßprüfung nach DIN  
 plus  
 [velotech.de 2010]

Zusätzlich muss der Rahmen mit Gewichten belastet werden, um eine Schwingungsdämpfung nach dem Schlag zu erzielen. Das Gewicht belastet den Rahmen als ob eine Person darauf sitzen würde, auch wenn im direkten Moment des Aufschlages theoretisch die Masse (Fahrer) nach vorn wegkippen müsste. In dieser Sache kann der Prüfstand die Realität nicht nachbilden. In Abbildung 27 ist zu erkennen, dass auch hier die Sitz- und Kettenstreben verformt werden.

Diese Verformung ist konstruktionsgerechter, da die Kettenstrebe genau so belastet wird wie im Fahrbetrieb und lediglich die Sitzstrebe negativ ihrer Auslegung belastet wird. Da anzunehmen ist, dass diese Zugkräfte geringer sind als die im Fahrbetrieb wirkenden Druckkräfte, sind keine strukturellen Schäden zu befürchten.

## 6 Versuchsablauf

### 6.1 Auswahl der Fahrzeuge

Zur Messung werden Stahlfahräder der Firma Schieber benutzt, insgesamt standen 7 Stück zur Verfügung. Diese Rahmen sind identisch mit einem Großteil der zuvor untersuchten Crash-Räder. Da diese eine geringe Steifigkeit und Formbeständigkeit besitzen, wird außerdem ein hochwertiges Mountainbike aus Aluminium (Alu MTB I) ausgewählt.

#### 6.1.1 Vorbereitung des Fahrzeuges

Vor den eigentlichen Versuchsfahrten, müssen die verschiedenen Fahrräder dafür vorbereitet werden. Die Rahmen werden mit den notwendigen Komponenten versehen und mit der DMS-Messtechnik bestückt. Die Positionierung der Messstellen wird, wie in Abschnitt 3.3 ermittelt, am Fahrzeug angebracht.

Die Anbauteile beider Modelle werden auf das Wesentliche reduziert. Auf eine Ausstattung gemäß StVZO wird verzichtet, da viele Komponenten für die Messfahrten nicht relevant sind. Um konstante, wetterunabhängige Bedingungen zu schaffen, werden alle Versuche im Halleninneren der Firma velotech.de durchgeführt.

#### 6.1.2 Versuchsstrecke

Als Versuchsstrecke wird ein Abschnitt der Halle der Firma velotech.de genutzt. Die Länge der Strecke beträgt ca. 8 m, auf denen das Fahrrad auf die notwendige Geschwindigkeit beschleunigt werden kann. In Abbildung 28 sind die Kameraposition, Startpunkt und die Fahrbahnmarkierungen eingezeichnet. Als Crashwiderstand wird die Halleninnenwand genutzt, die sich am Ende der Messstrecke befindet. Die Messfahrten werden mit einer Kamera gefilmt, um den Unfallablauf besser auswerten zu können.

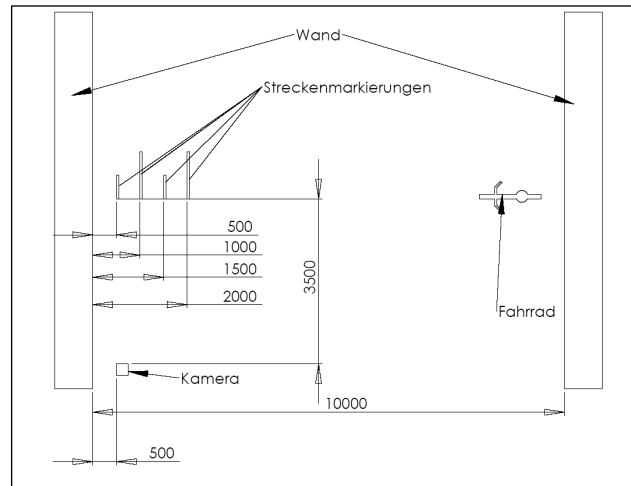


Abbildung 28 Skizze zum Versuchsaufbau „Crashfahrt“, Fahrrad gegen Wand  
Anhang 14.4 [velotech.de 2010]

### 6.1.3 Auswahl der Messmittel

Als Messmittel für nachfolgende Untersuchungen werden Dehnungsmessstreifen mit geeigneter Messtechnik eingesetzt. Die DMS werden am Oberrohr an Ober- und Unterseite angebracht.

### 6.1.4 Erfassung der Messwerte

Die Erfassung der Messwerte stellt besondere Anforderungen an die zu verwendende Messtechnik, da die Prüfmodelle nur einen begrenzten Platz bieten und die Messtechnik keinen Einfluss auf die folgenden Faktoren haben soll:

- der Fahrer darf in seiner Bewegungsfreiheit nicht eingeschränkt sein,
- das Fahrrad muss uneingeschränkt in seiner Funktion bleiben,
- die Anlage muss Erschütterungsresistent sein,
- das Gewicht und Abmaß der Messeinrichtung sollte ein gewisses Maß nicht überschreiten,
- der Energiebedarf muss gering sein und
- die Messungen müssen zeitsynchron erfolgen.

Bei den Messungen im Schlagpendelwerk sind diese Anforderungen nicht relevant, da diese Messungen dann Stationär erfolgen.

Da die Firma velotech.de bereits Erfahrungen mit der mobilen Datenerfassung vorweisen kann, kann auf ein bewährtes Datenaufzeichnungssystem zurückgegriffen werden: der Data Logger DL 16

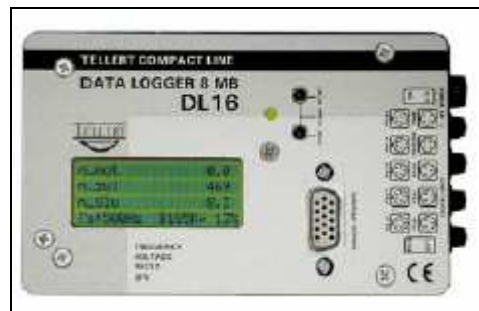


Abbildung 29: Datenlogger DL16, [Fa. Tellert]

der Firma Tellert (Abbildung 29). Es besitzt einen 8MB großer Sram Speicher. Die Auflösungen von 10 Bit und eine Abtastrate von 3000Hz ermöglichen Messungen von ca. 10 Minuten Länge, die Datenrate beträgt dabei 1300KB/s. Inklusiv des Messverstärkers, Batteriepacks und einer Satteltasche liegt das Systemgewicht unter 400g. Der benötigte Platzbedarf ist so gering, dass es in einer Satteltasche untergebracht werden kann. Die Messdaten werden über eine Schnittstelle an ein PC-Programm übergeben, das den DL16 parametriert und auf dem alle notwendigen Voreinstellungen (z.B. Abtastraten, Kanalbelegung, kleine Berechnungen usw.) durchgeführt werden. Eine graphische und tabellarische Auswertung der Messdaten ist nach der Messung auf einem PC möglich.

## 6.2 Ablauf der Testfahrten

Bei den Crashfahrten wird mit den zwei Fahrradtypen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gegen das starre Hindernis (Wand) gefahren. Unterschiedliche Stoßenergien werden mit unterschiedlich hohen Geschwindigkeiten reguliert. Nach jeder Fahrt werden die Radstände vermessen, um evtl. dauerhafte Verformungen zu überprüfen. Bei der

späteren Datenauswertung kann ein Vergleich zwischen gemessener und ermittelter Radstandverkürzung getroffen werden.

### 6.3 Schlagpendel

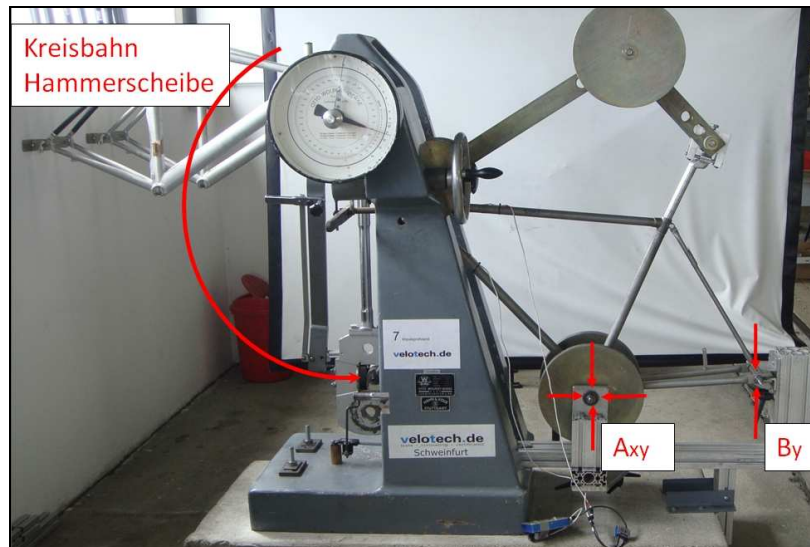


Abbildung 30 Schlagpendel der Fa. velotech.de [velotech.de 2010]

Die in Praxisversuchen ermittelten Daten werden mit denen aus dem Prüfstand der Fa. velotech.de verglichen. In das Schlagpendel werden die Prüfmuster eingespannt, um sie mit unterschiedlichen steigenden Schlagenergien zu belasten. Dabei wird eine Datenaufzeichnung mit Hilfe des DL16, analog den Testfahrten, durchgeführt. In Abbildung 30 ist der Prüfaufbau mit eingezeichnetem Festlager  $A_{xy}$  und dem Loslager  $B_y$  dargestellt. Das Schwingen des Rahmens nach dem Schlagen soll durch die abgebildeten Scheibengewichte gedämpft werden.

Der Prüfstand wurde mit 2 unterschiedlichen Prallbocksystemen bestückt.



Abbildung 31 Hammerscheibe mit Schlagkeil [velotech.de 2010]

An der Hammerscheibe des Schlagpendels (Abbildung 31) können unterschiedliche Prallbocksysteme befestigt werden, welche von der Rückseite mit 2 M8 Schrauben befestigt sind. Das bisherige System besitzt einen Stahlkeil (Abbildung 32), der die Kräfte punktuell über eine Keule, die an den Gabelausfallenden verschraubt ist, in den Rahmen einleitet. Diese Lösung ist durch die kleine Wirkfläche ungünstig. Eine Lösung mit einer größeren Wirkfläche kann für einen höheren Energieeintrag und damit zu



Abbildung 32 Stahlkeil mit Befestigungsteilen [velotech.de 2010]



Abbildung 33 Kautschukscheibe mit Befestigungsteilen [velotech.de 2010]

einer erhöhten Schlagenergie führen, die in das System gelangt. Die Verwendung einer Kautschukscheibe zur Lösung der Problematik stellt sich in der Überlegung als einfach und praktikabel dar. Auch die Befestigung an der Hammerscheibe ist durch die vorhandene Werkzeughalterung gut

möglich. Die an der Hammerscheibe befestigte Kautschukscheibe (ca. 50 Shore, zZt. Eishockey Puck) wird von einer Stahlscheibe abgestützt und gegen die an der Gabel befestigte Rolle geschlagen (Abbildung 33). Ohne die Abstützung würde der Kautschuk zu stark verformt werden. Das könnte zu vorzeitigem versagen des Puffers führen und der gewollte Effekt der größeren Energieeinleitung könnte negativ beeinflusst werden.

## 7 Kalibrierung und Fehlerbetrachtung

### 7.1 Fehlerrechnung

Durch das direkte Kalibrieren der Messkanäle auf dem Bremssteifigkeitsprüfstand mit Hilfe eines geführten Druckluftzylinders und einer geeichten Kraftmessdose werden alle internen Fehler ausgeschlossen. Es sind nur noch 3 Fehlerquellen möglich:

- Messfehler durch Kraftmessdose und Anzeige,
- Ausrichtungsfehler, da der Kolben geführt und der Fahrradrahmen nur am Hinterbau ohne Spurversatzkompensation befestigt wird, und
- Quantifizierungsfehler durch die relativ geringe Auflösung des Messsignals.

Durch die analoge Signaleingabe und der digitalen Auswertung kommt es im Messsystem zu einem Quantifizierungsfehler. Bei einem analogen Signal wird der Wertebereich über reelle Zahlen definiert; in der digitalen Darstellung wird das Signal in Bit aufgeteilt. Zur Verarbeitung werden Dezimalbrüche mit endlicher Genauigkeit verwendet. Bei der Umwandlung der Signale muss gerundet werden; diese Rundungsfehler werden als Quantifizierungsfehler bezeichnet.

Der absolute Quantifizierungsfehler durch Auflösung von 10 Bit bei einem Messbereich von 5 V beträgt nach Gleichung 7.1  $\pm 4,883 \text{ mV}$ . Der relative Quantifizierungsfehler beträgt  $\pm 0,0977 \text{ \%}$ .

$$\frac{1}{1024} \cdot 5 = \pm 4,883 \cdot 10^{-3} \text{ V} = \underline{\underline{\pm 4,883 \text{ mV}}} \quad (\text{Gl. 7.1})$$

Die Kraftmessdose (KMD), die bei der Kalibrierung der Rahmen zum Einsatz gekommen ist, hat laut Datenblatt eine Abweichung von -2 N bei einem Messbereich bis 1000 N (Anhang 14.3 Datenblatt Kraftmessdose). Dies entspricht einer Fehlerabweichung von -0,002 %.



Der statistische relative Gesamtfehler  $f_{rel}$  der Messungen beträgt nach dem Verfahren der Summe der kleinsten Fehlerquadrate und somit nach Gleichung 7.2  $\pm 0,097\%$ .

$$f_{rel} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + \dots + F_n^2} \quad (\text{Gl. 7.2})$$

$$f_{rel+} = \sqrt{0,0977^2} = +0,0977\%$$

$$f_{rel-} = \sqrt{0,0977^2 + 0,002^2} = \underline{\underline{-0,09772\%}}$$

mit:

$F_x$  Einzelfehle       $f_{rel}$  Gesamtfehler

## 7.2 Kalibrierung

Der stehende unbelastete Rahmen wird in den Bremssteifigkeitsprüfstand eingespannt.



Abbildung 34 Bremssteifigkeitsprüfstand Fa. velotech.de [velotech.de 2010]

Die Kalibrierung (Abbildung 34) wird in Stufen ( $\Delta 100\text{ N}$ ) von  $0\text{ N} \dots 1000\text{ N}$  durchgeführt. Während der Messungen wurden die wirkende Kraft, die Radstandverkürzung und das Messsignal aufgezeichnet. Diese Messungen wurden für jeden Rahmen durchgeführt. In Diagramm 1 am Beispiel des Prüfrahmens Alu MTB I dargestellt.

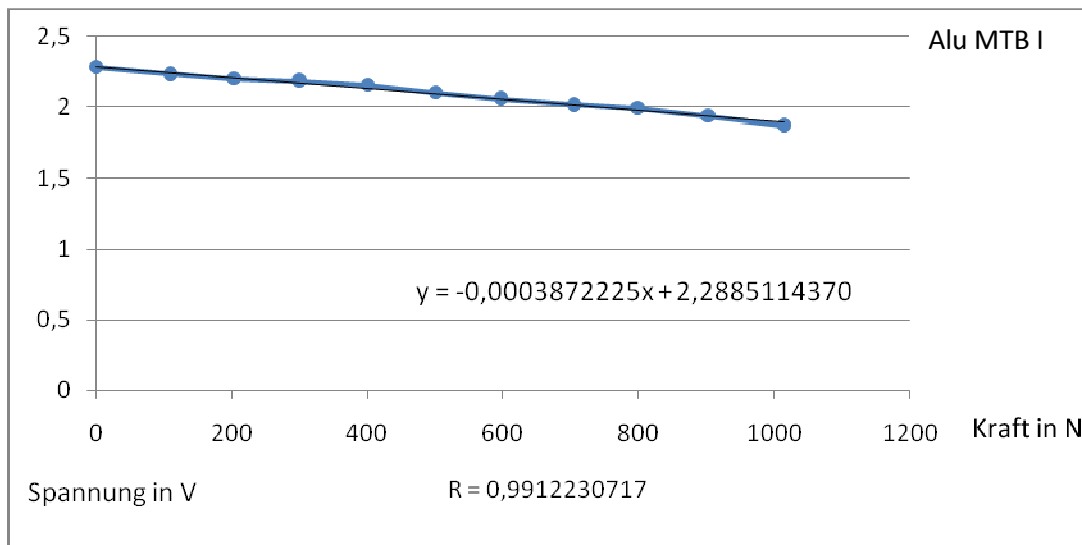


Diagramm 1 Kalibration Alu MTB I; Ausgabe der Messspannung der DMS

Im Diagramm 1 ist zu erkennen, in welchem Zusammenhang die Messspannung zur eingeleiteten Bremskraft steht. Das Diagramm wurde anhand der Messdaten (Anhang) erstellt. Aus diesen Daten kann dann auf das wirkende Moment am Steuerrohr geschlossen werden. Für eine bessere Auswertung der Daten wird das Messsignal in eine Radstandverkürzung umgerechnet. Die Umwandlung der Daten erfolgt über die Steigung der gewonnenen Funktion (Gl. 7.1).

$$y = mx + n \quad (\text{Gl. 7.1})$$

$$y = -0,0003872225x + 2,28851 \quad (\text{rechnerisch ermittelt})$$

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (\text{Gl. 7.2})$$

mit:

$y$  Werte y-Achse

$n$  Nullpunkt

$x$  Werte x-Achse

$m$  Anstieg

Mit der Gleichung 7.2 könnte der Anstieg der Funktion ermittelt werden. Da die erfasste Funktion nicht vollständig linear ist, wurde dieser Wert rechnergestützt ermittelt. Durch die ermittelte Funktion können die gemessenen Spannungen in die entsprechenden messungsrelevanten Größen (wirkende Kraft, Radstandsverkürzung) umgewandelt werden. Dies geschieht durch Umstellung der Gleichung 7.2 nach  $x_2$  (Gl. 7.3):

$$x_2 = \left( \frac{(y_2 - y_1) + (m \cdot x_1)}{m} \right) \quad \text{Gl. (7.3)}$$

Alle Messdaten werden mit dieser Gleichung umgewandelt und in einem Weg-Kraft-Diagramm dargestellt (Diagramm 2).

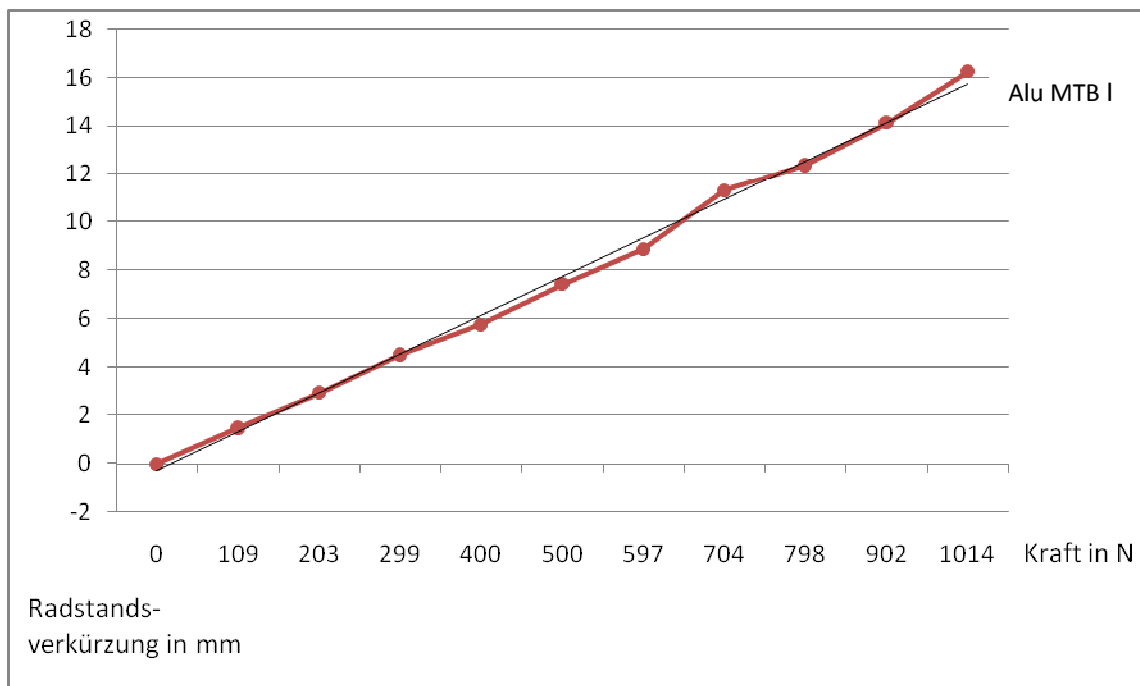


Diagramm 2 Kalibrierung Alu MTB I; Federrate des Rahmens, Einstellung der Messmittel

## 8. Auswertung der Messreihen

Nach der Vermessung (Kalibrierung) der einzelnen Fahrzeuge und der Auswahl der Teststrecke wurden die Fahrversuche durchgeführt. Dazu wurden die Strecke nach Abbildung 28 präpariert und die Fahrräder mit der Messtechnik ausgestattet.

### 8.1 Ergebnisse Fahrversuche

Die ersten Fahrversuche wurden im freien Gelände durchgeführt. Bei diesen Versuchsfahrten wurde festgestellt, dass die Rahmen des Modells Schieber schon bei geringen Aufprallenergien und damit verbundenen geringen Geschwindigkeiten eine plastische Verformung aufzeigten. Aus diesem Grund wurden die weiteren Versuche in die Halle verlagert. Da beim Prüfstand mit geringen Energien von bis zu 150 J geprüft wird, sind keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen notwendig. Die Aufschlaggeschwindigkeit entsprach nach Gleichung 8.1 mit  $m \approx 100 \text{ kg}$  (Fahrer+ Fahrrad) und  $E = 150 \text{ J}$  ca. 6,24 km/h.

$$v = \sqrt{\frac{E \cdot 2}{m}} \quad (\text{Gl. 8.1})$$

mit:

$v$  Geschwindigkeit [m/s]

$E$  Energie [J]

$m$  Masse [kg]

Die erste Testreihe wurde mit dem Modell Schieber durchgeführt. Da dieser Typ im Prüfstand bei 150 J zu starker plastischer Verformung neigte, wurden die Aufprallgeschwindigkeiten sehr langsam gesteigert. Die Geschwindigkeitsmessungen wurden mit Hilfe eines handelsüblichen Fahrradcomputers durchgeführt. Eine lasergestützte Geschwindigkeitsmessung war aus Kostengründen leider nicht möglich. Der Fahrradcomputer diente dem Probanden der besseren Einschätzung seiner Geschwindigkeit bei den Fahrten. Durch die Videoaufzeichnungen konnte danach noch eine

genauere Bestimmung der Geschwindigkeiten vorgenommen werden. Da die vorliegende Kamera nur mit 24 Bildern/ Sek. aufzeichnet, war diese Messmethode auch nicht hinreichend genau, um einen sicheren Wert zu erhalten. Alle Messfahrten sind so mit einer gewissen Fehlertoleranz unterworfen.

## 8.2 Ergebnisse Prüfstand

Der Prüfstand arbeitet nach dem Prinzip des im Punkt 2.9 erläuterten Pendelschlagwerkes. Die Rahmen wurden streng nach Arbeitsanweisung in der Vorrichtung befestigt. Nach dem Anschluss der Messtechnik (Abbildung 35) wurde der Schieber-Rahmen in 10 J Schritten bis zur Höchstlast von 150 J belastet. Der Rahmen des Typs Alu MTB I wurde in 30 J Stufen bis zur gleichen Höchstlast geschlagen. Bei beiden Rahmentypen wurden die beiden verschiedenen Schlagwerkstoffe verwendet. Beim Schlagen des Schieber Rahmens wurde ständig zwischen den Prallsystemen gewechselt, da Tests ohne Messtechnik gezeigt haben, dass es zum frühzeitigen Strukturversagen kommen kann.



Abbildung 35 Versuchsaufbau mit angeschlossener Messtechnik [velotech.de 2010]

### 8.2.1 Unterschied beider Systeme

Der Schlag mit dem Stahlelement war sehr ruckartig und kurz. Es wurde ein sehr kurzer Impuls in den Rahmen über Keule und Gabel eingeleitet. Die DMS-Technik eignete sich hervorragend zur Datenerfassung. Beim Schlagen mit dem Kautschukpuffer war der Vorgang leiser. Rein qualitativ lässt sich keine Aussage darüber treffen, welches System zu bevorzugen ist.

### 8.2.2 Ergebnisse Modell Schieber

Beim Schlagen der Stahlrahmen musste in besonders kleinen Schritten vorgegangen werden, da diese Rahmentypen schon bei ca. 60 J zu ersten Anzeichen plastischer Verformung neigten. Das Schlagen mit den unterschiedlichen Prallmaterialien ist bei den Messungen nicht von Bedeutung, da es bei niedrigen Energien keinen messbaren Unterschied der Verformungen gab. In Tabelle 4 ist zu sehen, dass der Rahmen bis zu einer Schlagenergie von 50J noch keine Radstandverkürzung und damit keine plastischen Verformungen aufweist. Erst bei einer größeren Prüfenergie sind Anzeichen von Verformung zu erkennen. Durch diese ist eine genaue Beurteilung des Rahmens nicht mehr möglich, da plastisch verformte und damit vorgeschädigte Bauteile ein anderes Schadensverhalten aufweisen. Bei der Kalibrierung dieses Rahmentyps zeigte sich schon bei der Bremssteifigkeit eine entscheidende Schwäche, die darauf schließen ließ, dass der Rahmen auch bei diesem Belastungstest keine hohen Werte erzielen würde. Schon bei einer statischen Belastung von 1300 N konnten die ersten Falten an den Unterseiten des Ober- und Unterrohres beobachtet werden.

Tabelle 4 Vergleich der Radstandverkürzungen mit dem Prüfstand

Werkstoff	Schlagenergie [J]	Radstand [mm]	Bemerkungen
Kautschuk	0	1130	
	5		
	10		
	15		
	20		
	25		
	50		
	80	1110	Verformung an Oberrohrunterseite
	150	1068	Verformung an Ober- und Unterrohr
Stahl	5	1130	
	7,5		
	10		
	12,5		
	15		
	150	1053	

### 8.2.3 Ergebnisse Modell Alu MTB I

Beim Schlagen dieses Rahmens kam es zu keinen messbaren strukturellen Veränderungen. Der Rahmen hielt allen Belastungen stand und wurde in erster Linie genutzt, um die zwei unterschiedlichen Prallsysteme miteinander zu vergleichen. Der darauf folgende Fahrttest sollte weitere Daten über den Prüfstand und den Bezug zur Realität erbringen.

## 8.3 Vergleich der Prallsysteme

Beim Vergleich der beiden Prallsysteme fällt auf, dass der erhoffte Effekt der stärkeren Energieeinleitung (beim Kautschukpuffer) kaum zum tragen kam und erst bei Energien >120 J sichtbar wurde. In Diagramm 3 sind die Schlagversuche von Kautschuk und Stahl der Laststufen 120 J und 150 J gegenüber gestellt. Es ist zu erkennen, dass die Verformungsspitzen (maximale Radstandverkürzung) beider Systeme gleich groß sind und lediglich ein kleiner Unterschied in der Einwirkdauer bestand. Bei einer Abtastrate von 3000 Hz beträgt dieser Unterschied allerdings wenige tausendstel Sekunden. Der Anstieg beider Kurven ist fast identisch. Bei

einer genauen Betrachtung ist aber ersichtlich, dass die Kurve des kautschukgeschlagenen Rahmen etwas flacher ansteigt und auch dass das Ausschwingverhalten ein anderes ist. Dieser Unterschied der beiden Materialien kommt wahrscheinlich durch den verschiedenen langen Impuls ( Kontaktdauer Keule-Schlagpuffer) der eingeleiteten Energie zustande. Die Schlagenergieeinwirkung ist bei Kautschuk „sanfter“ bzw. verzögert und das Ausschwingverhalten dauert somit länger an.

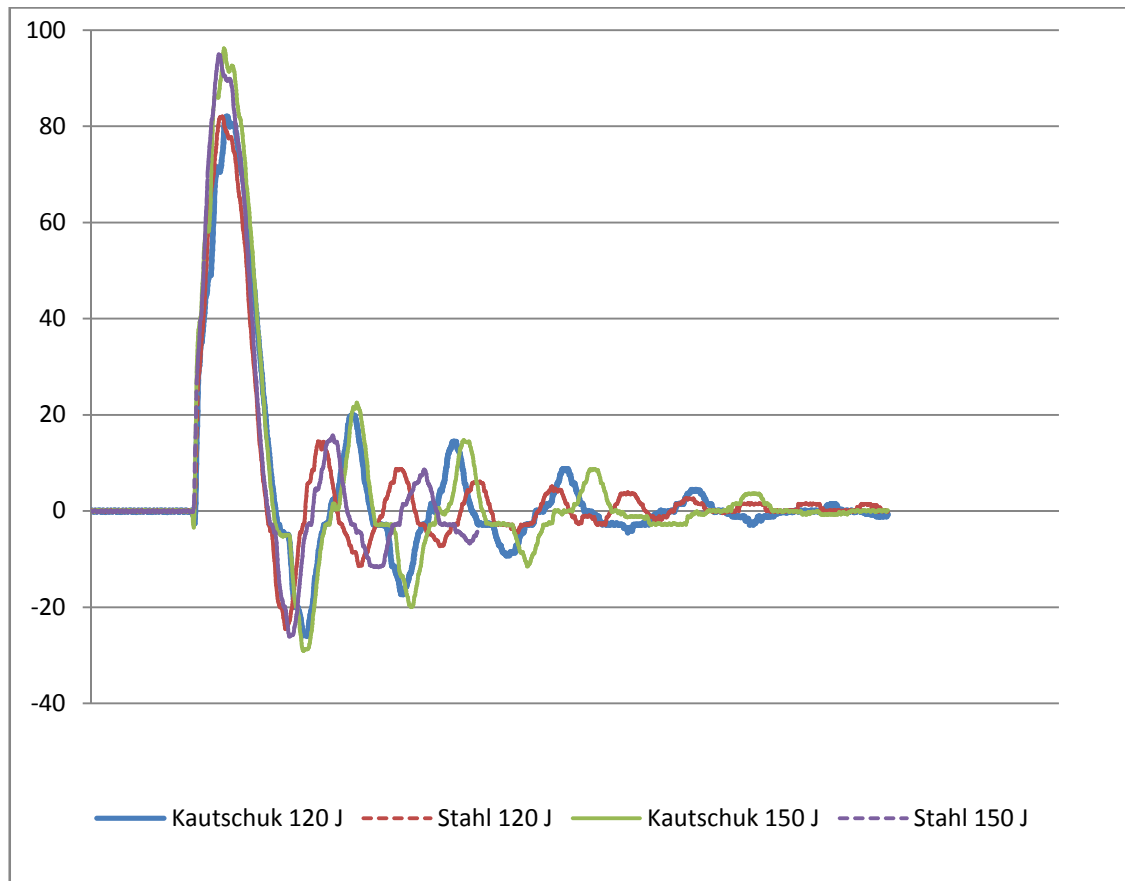


Diagramm 3 Vergleich der Prallsysteme; Kautschuk und Stahl bei 120J und 150J



## 9 Vergleich Fahrversuche und Prüfstand

Die Ergebnisse der darauf folgenden Fahrversuche dienen zum Vergleich von Praxis und Labor.

### 9.1 Auswertung der Stahlrahmenfahräder

Der Prüfzyklus der Fahrräder wurde so gewählt, dass bei langsamer Steigerung der Fahrgeschwindigkeiten die jeweilige Radstandverkürzung gemessen werden konnte. Die Fahrten wurden von 2 unterschiedlichen Personen durchgeführt.

- Rahmen 0006
- Reifendruck 2,3 bar
- Systemgewicht 84,1 kg (Fahrt 1...4)
- Systemgewicht 93,1 kg (Fahrt 5)

Tabelle 5 Aufprallgeschwindigkeiten mit den zugehörigen Energien und den daraus resultierenden Radstandverkürzungen

Geschwindigkeit [m/s]	Aufprallenergie [J]	Radstand [mm]	Bemerkungen
1,66	138,125	1185	
1,075	57,49	1185	
1,875	174,81	1104	Verformung an Oberrohr
2,32	268,929	1084	
2,38	307,398	1000	

In Tabelle 5 sind Geschwindigkeit, Energie und der Radstand vermerkt. Bei einer theoretischen Aufprallgeschwindigkeit von 170 J hat sich das Fahrrad dauerhaft verformt. Bei einer Energie von 60 J kam es nur zu einer reinen elastischen Verformung des Fahrrades.

Beim Vergleichsversuch mit elastischer Verformung wurden beide Stahlrahmen im ähnlichen Maße gestaucht. In diesem Belastungsfall waren Prüfstand und Realität annähernd gleich. In Tabelle 6 sind die gemessenen Radstandsverkürzungen beim Aufprall zu sehen.

Tabelle 6 Vergleich Fahrversuche/ Prüfstand Stahlrahmenräder

Versuchsart	elastische Verformung	Energie
Pendelschlag	25 mm	50 J
Versuchsfahrt	26 mm	57 J

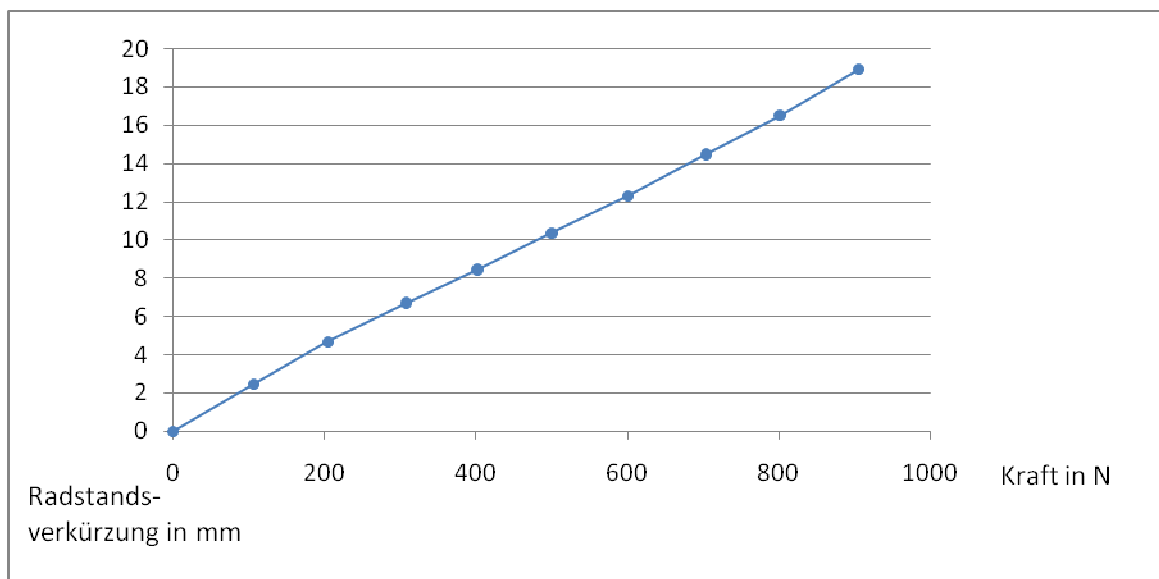


Diagramm 4 Federrate des Stahlrahmens

Aus den Daten, die bei der Kalibrierung (Diagramm 4) gemessen wurden, kann man die Federrate des Rahmens bestimmen. Die Federrate wird in N/mm angegeben und kann mit der Formel 9.1 berechnet werden.

$$D = \frac{F}{L} \quad (\text{Gl. 9.1})$$

Für den Schieber Rahmen beträgt die Federrate 50 N/mm. Dieser Wert ist wenig aussagekräftig, da dadurch nicht auf die plastische

Verformungsresistenz geschlossen werden kann. Zum Vergleich wurden noch ein Karbon-Rennrad (Karbon RR) und ein handelsübliches Mountainbike (MTB) sowie das Modell Alu MTB I geprüft. Trotz der größeren Federrate, im Vergleich zu RR oder MTB, versagt der Schieberrahmen als erster bei der Bremssteifigkeitsprüfung. In Tabelle 7 sind die vier Fahrradtypen in Bezug zu ihren spezifischen Bremssteifigkeiten (Federrate) eingeordnet.

Tabelle 7 Vergleich Bremssteifigkeit

Modell	Schieber	Karbon RR	Alu MTB I	Alu MTB II
Federrate in N/mm	50	48	62	42

Die Modelle liegen alle sehr nahe beieinander. Entgegen den Erwartungen ist der Schieberrahmen sogar vermeintlich steifer als ein Mountainbike der Mittelklasse. Dies könnte daran liegen, dass bei der Messung des MTB Rahmens die verbaute Federgabel eingefedert und so die Messungen evtl. verfälscht hat. Der Schieber Rahmen wurde hingegen mit einer starren Gabel getestet, welche die Kraft anders als eine Federgabel in den Rahmen eingeleitet hat. Bei den Tests hat sich somit herausgestellt, dass diese Art von Messung keine aufschlussreichen Werte über die Festigkeit der Rahmen liefert. Wie bereits erwähnt zeigte der Schieberrahmen bereits bei 1300 N erste Anzeichen dauerhafter Schäden, wohingegen die anderen 3 Modelle selbst nach der Bremssteifigkeitsanlagen-Höchstlast von ca. 1650 N noch immer ohne dauerhafte Beschädigungen in ihre ursprüngliche Form zurück kehrten. Bei den anderen Modellen waren alle Verformungen rein elastisch.

## 9.2 Alu MTB I

Nach den Schlagtests, die der Prüfling ohne messbare Beschädigungen überstanden hat, wurden die Fahrversuche durchgeführt. Die Praxisversuche konnten bei diesem Modell umfangreicher gestaltet werden, da mit keinem vorzeitigen Versagen zu rechnen war. Bei den Messfahrten wurden Energien von bis zu 330 J erreicht, ohne dass es zu messbaren Beschädigungen kam. Nach den Versuchen wurden die Geschwindigkeiten

mit Hilfe der Videoanalyse bestimmt. Die Fehler, die bei dieser Berechnung entstanden, wurden schon beim Schieber Rahmen erläutert.

Tabelle 8 Vergleich Fahrversuche/ Prüfstand Alu MTB I

Versuchsart	Aufprallenergie [J]	Radstand (Federweg) [mm]
Fahrt 1.3	131	37
Fahrt 1.5	172	47
Fahrt 3.1	100	28
Fahrt 4.4	107	40
Fahrt 4.5	153	52
Schlagtest Kautschuk	90	67
	120	82
	150	97
Schlagtest Stahl	90	70
	120	83
	150	94

Die Daten der einzelnen Messfahrten zeigen alle einen ähnlichen Verlauf der Messkurve. Zwei Verlaufsbeispiele sind in Diagramm 5 dargestellt. In Tabelle 8 fällt auf, dass die Belastungen für den Rahmen beim Fahren und auf dem Prüfstand völlig unterschiedlich sind. Beim Schlagtest hingegen sind die Werte zwischen den unterschiedlichen Systemen (Kautschuk und Stahl) identisch.

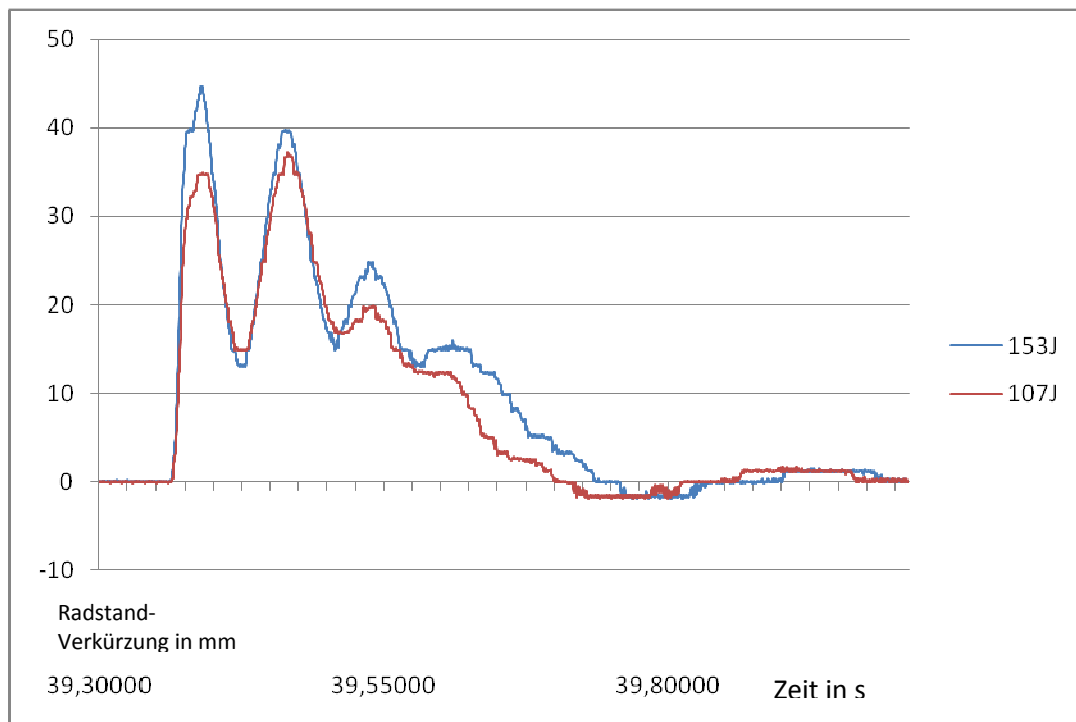


Diagramm 5 Versuchsfahrten 4.4 und 4.5 mit Alu MTB I

In Diagramm 5 sind zwei typische Kurven dargestellt, die bei dem Fahren auf das Hindernis entstanden sind. Der Bewegungsablauf unterscheidet sich stark von dem auf dem Prüfstand. Das ist darauf zurückzuführen, dass auf dem Prüfstand das Pendel zurück schlägt und danach gebremst wird ohne wieder auf den Rahmen zu schlagen. Bei den Crashfahrten ist es vermutlich so, dass der Rahmen wieder ausfedern will, dies aber nur im kleinen Maße kann, denn alle Fliehkräfte (Fahrermasse und Fahrradmasse) wirken dieser Bewegung entgegen. So wird der Rahmen noch einmal zusammen gedrückt, da immer noch die träge Masse des Fahrers nach vorn will. Das erklärt den zweiten starken Anstieg. Die Testfahrten wurden mit 2 unterschiedlichen Reifendrücken (2 bar und 3 bar) durchgeführt. Je nach verwendetem Druck, kann kein Unterschied in den Messdaten festgestellt werden.

### 9.3 Zusammenfassung der Ergebnisse.

Die Versuche mit den verschiedenen Rahmentypen haben völlig unterschiedliche Ergebnisse ergeben. Der Verformungsgrad des Rahmens beim Modell Schieber ist bei gleich großer Belastungsenergie sowohl am

Prüfstand als auch in der Realität fast gleich groß (Tabelle 5). Beim Aluminium Fahrrad trifft dies nun nicht mehr zu. Eine der Ursachen für das



Abbildung 36 Testrad Alu MTB I mit Messtechnik [velotech.de 2010]

unterschiedliche Ergebnis ist der Unfallverlauf. Die Sitzpositionen und Rahmengenometrien (Anhang 14.4 Rahmengenometrie eines Stahlprüflings vor und nach dem Test )der beiden Prüfrahmen sind verschieden. Dies hat zu Folge, dass bei den Fahrten der Massenschwerpunkt des Systems (Fahrer-Fahrrad) jeweils an einem anderen Punkt liegt. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Gewichtsverteilung und damit auf das Verhalten des Rahmens nach dem Aufprall. Beim Fahren mit dem Alu MTB I war es nicht möglich ein Abheben des Hinterrades im Moment des Aufpralls zu vermeiden. Das aufsteigende Hinterrad vernichtet ebenfalls Energie. Kinetische in potentielle Energie gewandelt, die benötigt wird, um das Hinterrad anzuheben. Einen weiteren Einfluss hat das vordere Rad beim Aufprall. Es ist aus mehreren Komponenten zusammengesetzt. Die äußerste Schicht besteht aus dem mit Luft gefüllten Reifen, der ein nicht unerhebliches Dämpfungspotential aufweist. Demnach wird die Energie über die Felge weiter gegeben, die sich entgegen der Fahrtrichtung bewegen will. Die Felge ist aber über unter Zugspannung stehende Drahtspeichen mit der Nabe verbunden. Die zur Wand zeigenden Speichen werden entlastet und die entgegengesetzten Speichen werden mit diesem Betrag mehr belastet. Dieser Vorgang kostet Energie und wirkt dämpfend.

## 10 Schlussfolgerung

Die durchgeführten Messungen haben zu unterschiedlichen Ergebnissen geführt, wofür Erklärungen gefunden werden müssen. Eine schon genannte Ursache kann das Absorptionsvermögen von Rad-Reifen sein.

Im Fahrversuch mit dem Aluminium MTB ist aufgefallen, dass nach dem Aufprall das Hinterrad vom Boden abgehoben ist. Die Ursache dafür kann eine Schwerpunktverlagerung in Richtung des Vorderrades sein. Dadurch wird der Hinterteil leichter und es kann zum Abheben des Hinterrades kommen. In diesem Moment wirkt ein Drehmoment an der Vorderradnabe. Es wird angenommen, dass ein Teil der kinetischen Energie in potentielle Energie gewandelt wird, damit das Hinterrad vom Boden abheben kann. In der nachfolgenden statischen Berechnung sollen die wirkenden Kräfte und Energien ansatzweise ermittelt werden. Bei der Berechnung wird angenommen, dass der Körperschwerpunkt vor dem Sattel liegt. In Abbildung 37 sind alle zur Berechnung nötigen Parameter skizziert.

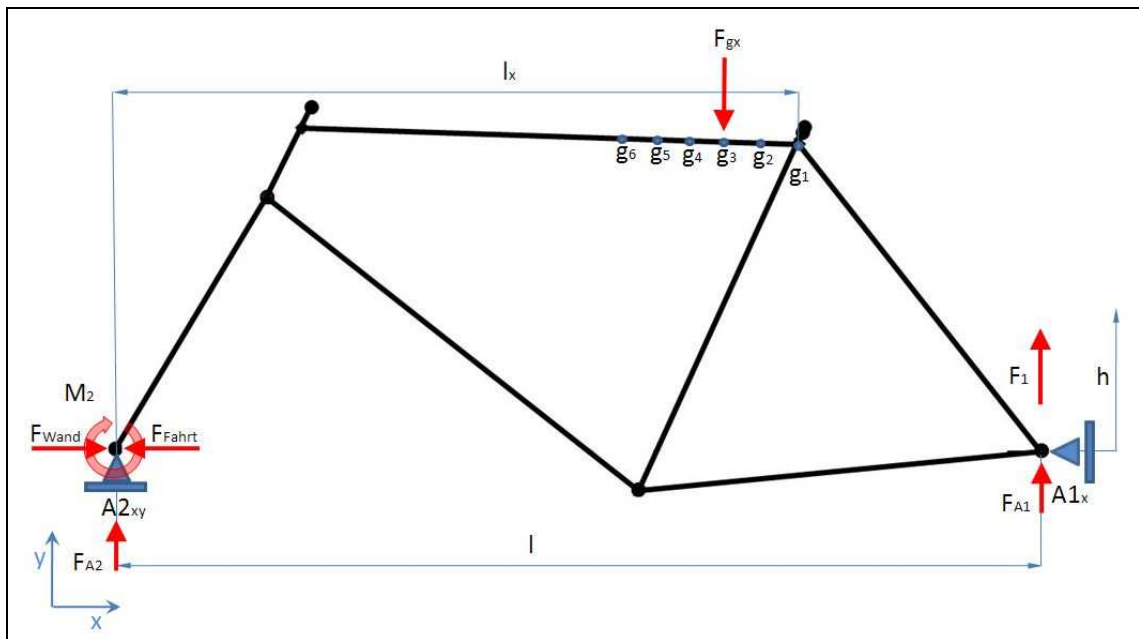


Abbildung 37 Skizze zur statischen Lastenuntersuchung [velotech.de 2010]

$$\sum F_y = 0 = F_1 + F_{A1} + F_{A2} - F_g \quad (\text{Gl. 9.1})$$

$$\sum F_x = 0 = F_{Wand} - F_{Fahrt} \quad (\text{Gl. 9.2})$$

$$\sum M_2 = 0 = F_1 \cdot l + F_{A1} - F_g \cdot l_x \quad (\text{Gl. 9.3})$$

mit:

$F_1$  Kraft zum Anheben des Hinterrades (HR)

$h$  Aufstiegshöhe HR (50mm, 70mm, 100mm, 130mm)

$F_{A1}$  Rad-Aufstandskraft HR (40kg)

$F_{A2}$  Rad-Aufstandskraft VR (60kg)

$F_g$  Gewichtskraft (Massenschwerpunkt) 100kg

$l$  Radstand (1157mm)

$l_x$  Abstand Massenschwerpunkt zu Lager A2

Im Ausgangszustand ist das Hinterrad voll belastet und somit muss die wirkende Kraft, die für ein Anheben des Rades verantwortlich ist, 0N sein. Durch Umstellen der Gl. 9.1 nach  $F_1$  (Gl. 9.4) lässt sich dies beweisen:

$$F_1 = F_g - F_{A1} - F_{A2} \quad (\text{Gl. 9.4})$$

$$F_1 = 981\text{N} - 588,6\text{N} - 392,4\text{N} = \underline{0\text{N}}$$

Beim Kontakt mit der Wand tritt ein Moment am Vorderrad auf. Dies führt dazu, dass das Hinterrad vom Boden abhebt. Mit Hilfe der Videoauswertung



Tabelle 9 Benötigte potentielle Energie zum Anheben des Hinterrades beim Frontalcrash

		Massenschwerpunktabstand von A2 [mm]						
		730	760	790	820	850	887	
Aufstiegshöhe $h$ [mm]	50	16,1865	17,658	19,1295	20,601	22,0725	23,88735	potentielle Energie [J] (Radaufstieg)
	70	22,6611	24,7212	26,7813	28,8414	30,9015	33,44229	
	100	32,373	35,316	38,259	41,202	44,145	47,7747	
	130	42,0849	45,9108	49,7367	53,5626	57,3885	62,10711	

wurde diese Höhe grafisch ermittelt; da diese Messung sehr ungenau ist, werden verschiedene Höhen  $h$  für die Berechnungen benutzt. Desweiteren werden für die Betrachtung verschiedene Schwerpunktpositionen angenommen. Durch umstellen der Momentengleichung 9.3 können die benötigten potentiellen Energien errechnet werden.

$$F_1 = \frac{F_g \cdot l_x - F_{A1} \cdot l}{l} \quad (\text{Gl. 9.5})$$

In Tabelle 9 sind die verschiedenen Variationsmöglichkeiten dargestellt. Es wurden zwischen 50 mm und 130 mm Abstand des Rades zum Boden und einer Verlagerung des Schwerpunktes von bis zu 150 mm, ausgehend von der Sattelstütze in Richtung des Vorderrades, Berechnungen durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass durch das Aufsteigen des Hinterrades bis zu 60 J Energie benötigt werden. Diese Energie wird aus einem Teil der kinetischen Fahrtenergie umgewandelt. Ein Teil der Fahrtenergie wird auf diese Art und Weise vernichtet und somit nicht in das vordere Rahmendreieck eingeleitet. Beim Prüfstand ist so ein Verhalten nicht möglich, da der Rahmen fest eingespannt ist. Unter der Annahme, dass beim Aufprall mit 150 J auf die Wand ca. 35 J in potentielle Energie umgewandelt werden und noch ein Teil von angenommenen 25 J im Laufrad abgebaut werden, ist die effektiv messbare Aufprallenergie, die der Rahmen verarbeiten muss, auf ca. 90 J gesunken.

Die benötigte Energie zum anheben des Hinterrades lässt sich mit der Gleichung 9.6 errechnen [Gieck 2005]:

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h \quad (\text{Gl. 9.6})$$

mit:

$m$  Masse       $g$  Erdbeschleunigung       $h$  Aufstiegshöhe

Für Masse und Erdbeschleunigung wird die ermittelte Kraft  $F_1$  ( $F=m \cdot a$ ) aus Gleichung 9.4 eingesetzt; daraus ergibt sich:

$$E_{pot} = F_1 \cdot h \quad (\text{Gl. 9.7})$$

Die mit Gleichung 9.7 errechneten potentiellen Energien sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Wird nun das Schlagen mit 90 J auf dem Prüfstand mit dem 150 J starken Fahren gegen die Wand miteinander verglichen, fällt immer noch auf, dass der Prüfstand eine höhere Belastung für den Rahmen darstellt (im Falle des Aluminiumrahmens). Werden außerdem noch die Fahrten mit deutlich größeren Stoßenergien ausgewertet, die im Fahrversuch ermittelt wurden, dann ist zu erkennen, dass die Belastungen für den Rahmen nicht mehr steigen. Ein Grund dafür kann sein, dass es ab einer bestimmten Geschwindigkeit und damit Energie nicht mehr möglich ist, diese in den Rahmen einzuleiten. Stattdessen wird diese überschüssige Energie auf anderem Wege abgebaut, z.B. durch das Aufsteigen des Hinterrades oder das vorzeitige Absteigen des Fahrers. Diese Erkenntnis lässt sich aber nicht einfach für alle Fahrradtypen pauschalisieren, denn bei jeder Änderung der Sitzposition ist die Krafteinleitung eine andere, da jeder Fahrradtyp andere Geometrien hat. Ein Rennradfahrer hat z.B. einen nach vorn verlagerten tiefen Schwerpunkt im Gegensatz zu einem City-Rad, wo die Sitzposition sehr aufrecht ist (siehe Abbildung 38), der Schwerpunkt somit auch höher und (im Vergleich zum Rennrad) zurück gesetzt ist. Durch diese unterschiedlichen Sitzpositionen ist das Verhalten des Fahrers beim Unfall voraussichtlich völlig unterschiedlich. In der geduckten Position, in welcher der Schwerpunkt wahrscheinlich schon vor dem eigentlichen Crash über der Lenkerhöhe ist, wird der Fahrer sich kaum in den Lenker stemmen können. Beim City-Rad ist es dem Fahrer möglich, durch die viel höhere Lenkerposition und den im Verhältnis tiefen Schwerpunkt in einer Unfallsituation sehr viel Gegendruck zu erzeugen und einen großen Teil seiner Masse in den Rahmen einzuleiten. Dadurch ist die wirkende Energie größer als beim Rennrad und dessen Fahrer. Dieser wird durch die geduckte Körperhaltung

um ein vielfaches früher über den Lenker katapultiert. In diesem Zusammenhang wird auch das Hinterrad viel schneller abheben und den Effekt des „über den Lenker Fliegens“ noch vergrößern.

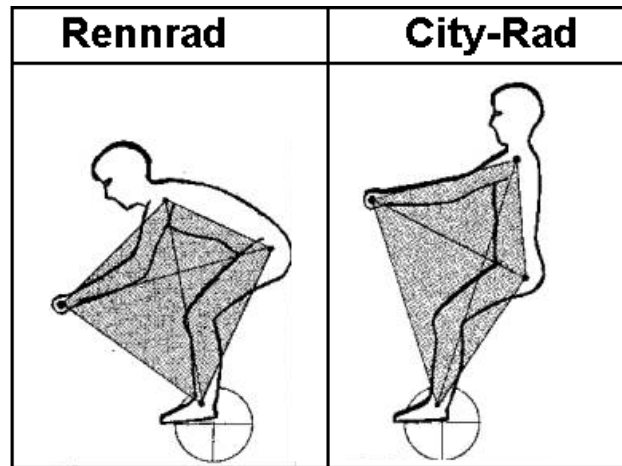


Abbildung 38 Sitzpositionen auf verschiedenen Fahrradttypen [Neuß 2004]

Werden die Radstände des Stahlrahmens von den Crashfahrten und vom Prüfstand miteinander verglichen und die wirkenden Energien beachtet, kann als Aussage getroffen werden, dass diese sich ähneln. Die Radstandverkürzungen bei beiden Versuchen ist ähnlich. In der Tabelle 10 sind die Werte für Crashfahrt und Schlagtest bei höchster Schlagstufe zu sehen. Der Rahmen wird aus den oben genannten Ursachen im Prüfstand mehr beansprucht als in der Fahrversuch. Beim Aluminium MTB I

Tabelle 10 Ergebnis des Vergleiches beim Stahlrahmen

Rahmen	Crashfahrt [mm]	Schlagtest [mm]
vorher	1158	1130
nachher	1004	1078
Differenz	54	62
Energie	ca.170 J	ca.150 J

sind die Unterschiede zwischen Prüfstand und Crashfahrt noch gravierender. Zu beachten ist auch, dass die Verformung rein elastisch ist. Ein Grund dafür ist, dass der Aluminiumrahmen eine höhere Festigkeit vorzuweisen hat. Gründe dafür sind in der Konstruktion der Modelle als auch im Werkstoffverhalten zu suchen.

Tabelle 11 Ergebnis des Aluminium MTB I

Rahmen	Crashfahrt [mm]	Crashfahrt [mm]	Schlagtest [mm]	Schlagtest [mm]
vorher	1136	1136	1136	1136
nachher	1084	1074	1066	1042
differenz	52	62	70	94
Energie	153J	187J	90J	150J

Der Alurahmen federt bei der Annahme gleicher Energien (Fahrversuch und Pendelschlagwerk) um das Doppelte ein (Tabelle 11). Das bedeutet, dass der Prüfstand bei gleicher Belastungsenergie eine elastische Verformungsarbeit um den Faktor 2 am Rahmen hervorruft.

Tabelle 12 Werkstoffvergleich DIN EN 10025 S185 und EN AW-7005

Werkstoff	S185	AW 7005
Zugfestigkeit	310 N/mm <sup>2</sup>	350 N/mm <sup>2</sup>
Streckgrenze	185 N/mm <sup>2</sup>	290 N/mm <sup>2</sup>
Bruchdehnung	18 %	8...10 %
Wärmebehandlung	—	T6 (lösungsgeglüht, warm ausgelagert)

[DIN EN 10025 S185; EN AW-7005]

An den Werkstoffeigenschaften (Tabelle 12) ist klar zu erkennen, dass diese Aluminiumlegierung eine um einiges größere Streckgrenze besitzt. Das bringt dem Aluminiumrahmen eine höhere Festigkeit und auch größere Steife. Die halb so große Bruchdehnung bewirkt im Falle einer Überbeanspruchung aber auch ein abrupteres Totalversagen der Konstruktion. Ein weiterer gravierender Unterschied der beiden Rahmen resultiert aus den Materialeigenschaften. Die Rohrquerschnitte von Oberrohr und Unterrohr liegen weit auseinander. Sind es beim Stahlrahmen 24 mm am Oberrohr und 26 mm am Unterrohr, hat der Aluminiumrahmen 42 mm am Oberrohr und 54 mm am Unterrohr. Die doppelt so großen Querschnitte

sind ein wesentlicher Grund für die höhere Festigkeit. Hätte der Aluminiumrahmen versagt hätte das mit großer Wahrscheinlichkeit nicht nur zur Faltenbildung wie beim Stahlrahmen geführt, sondern es hätten durch die geringere Bruchdehnung Risse und scharfe Kanten entstehen können; das birgt ein erhöhtes Verletzungsrisiko.

Der Prüfstand hat unter den gegebenen Prüfkriterien, den Aluminiumrahmen um das 1,8 Fache stärker verformt. Beim schlagen mit 90 J sind es dagegen das 1,3 Fache. Das lässt den Schluss zu, dass durch das abheben des Hinterrades ein Teil der kinetischen Aufprallenergie in potentielle Energie umgewandelt und ein anderer Teil in der Rad-Reifen Kombination abgebaut wird.

## 11 Zusammenfassung

Der bestehende Prüfstand in der Fa. velotech.de, der den Frontalstoß nachbildet, wurde hinsichtlich seiner Realitätsnähe untersucht. In der DIN EN für Fahrradprüfung ist ebenfalls eine Richtlinie für den Frontalstoß hinterlegt. Diese unterscheidet sich nicht nur in Art und Weise der Durchführung, sondern auch in der Intensität. Wird bei der DIN EN Prüfung zwischen verschiedenen Fahrradtypen unterschieden und damit auch zwischen den Prüfkraften, wird bei der velotech.de eigenen Prüfung jeder Fahrradtyp mit der gleichen Prüfenergie getestet. Selbst bei der härtesten Schlagprüfung in der DIN EN 14766 (für Mountain Bikes) beträgt die maximale Prüfkraft 80 Joule. Das entspricht bei einer 100 kg schweren Person, die mit einem 15 kg schweren Fahrrad unterwegs ist, einer Geschwindigkeit bis ca. 4,3 km/h. Das ist in etwa die durchschnittliche Schrittgeschwindigkeit eines Erwachsenen.

Der bei velotech.de angewendete DIN plus Standard sieht eine Aufprallenergie von 150 Joule vor, das entspricht einer Geschwindigkeit von ca. 5,8 km/h. Selbst wenn man ein 35 kg leichtes Kind annimmt, welches zusammen mit Fahrrad nur die Hälfte der Masse besitzt, beträgt die Geschwindigkeit nur ca. 8,8 km/h. Legt man dies zu Grunde ist eine Typisierung der Stoßprüfung nicht notwendig, da die Prüfenergien der DIN EN noch deutlich unter denen der DIN plus liegen. Da sich beide Prüfungen auch hinsichtlich ihres Aufbaues unterscheiden war ein Abgleich unter realen Testbedingungen notwendig. Das war nur mit Hilfe von Fahrversuchen möglich. Nach einer Auswertung von vorhandenen Unfallfahrrädern, bereitgestellt durch die Fa. BASF, wurden weitere Versuche mit 2 unterschiedlichen Rahmentypen durchgeführt. Die Rahmen unterschieden sich im Material (Stahl und Aluminium) und in deren konstruktiver Auslegung.

Bei den Versuchen die mittels der Dehnmessstreifentechnik aufgenommen worden sind, ist aufgefallen, dass sich die Rahmen völlig unterschiedlich verhalten. Der sehr zähe und weiche Stahlrahmen zeigte während der Messungen schon frühe Anzeichen von Versagen, so dass insgesamt 7 Exemplare verschlissen wurden. Im Gegensatz dazu konnten alle

Messungen mit einem Aluminiumrahmen ohne messbare Beeinträchtigungen der Struktur durchgeführt werden.

Die qualitative Aussage zum Prüfstand Pendelschlagwerk lässt sich hervorragend mit den Stahlrahmen treffen, da Art und Weise der strukturellen Verformungen sehr ähnlich denen der Freifahrten sind. Bei der Prüfung der Stahlrahmen sind die Beanspruchungen bei nominell gleicher Schlagenergie in etwa gleich groß. Eine dauerhafte Verformung tritt schon weit unter der eigentlichen Prüfenergie von 150J auf. Die Stahlrahmen sollten keine Zulassung nach DIN plus erhalten.

## 12 Ausblick

Für die Zukunft sollten neue Prüfkonzpte erarbeitet und die allgemein gültigen Normen dem Stand der Technik angepasst werden. Ein Ansatz ist die Prüfung der Bauteile nach DIN plus, die in vielen Bereichen die DIN EN Prüfungen als Vorlage nutzt und um sinnvolle Tests erweitert bzw. noch intensiver prüft. Speziell im Bereich der Frontalstoßsimulation sind verschiedene Lösungsansätze denkbar, da derzeit in der DIN EN wie auch DIN plus nur die Rahmen-Gabel-Einheit geprüft wird. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben allerdings gezeigt, dass auch das Laufrad bei einem Unfall eine große Rolle spielt. Auch die Sitzposition der unterschiedlichen Rahmenmodelle sollte nicht außer Acht bleiben.

Einen sehr guten realitätsnahen Prüfstand zu entwickeln ist sehr kosten- und zeitintensiv. Im Schweizer Fernsehen (Magazin 10 vor 10) wurde am 01.07.2010 ein Bericht zum Thema „Unfallgefahren im Verkehr“ ausgestrahlt. In diesem Bericht wurde speziell auf die Gefahr vor zu sorglosen Umgang mit der neuen Gattung von Fahrrädern mit elektrischem Hilfsantrieb eingegangen. Dabei wurde eine Unfallsituation mit einem parkenden Auto und dem heran schnellenden Fahrrad nachgestellt. Um das Fahrrad für den Versuch auf die entsprechende Geschwindigkeit zu beschleunigen, wurde es von einem Käfig gestützt (Abbildung 39).



Abbildung 39 Crashtestaufbau der schweizer DEKRA [SF 2010]





Abbildung 40 Einschlag des Fahrrades in die Fahrzeughür [SF 2010]

Der Käfig wird mit dem Fahrrad auf die entsprechende Geschwindigkeit beschleunigt. Der Käfig wird ca. 4 m vor dem Hindernis abgebremst und bleibt sofort stehen. Das Fahrrad, was sich im Käfig befindet, fährt dann allein weiter. Die aufgrund der Geschwindigkeit wirkenden Kreiselkräfte lassen das Fahrrad auch weiterhin geradeaus fahren. Im speziellen Fall wird das Fahrrad auf eine Geschwindigkeit von 40 km/h beschleunigt. Je geringer die herrschenden Geschwindigkeiten sind, umso schwerer ist es das Fahrrad auszubalancieren. Der Vorteil dieser Anlage liegt darin, dass der komplette Ablauf sehr realitätsbezogen ist. Durch den Dummie wird der Fahrer simuliert und während des Aufpralls kann sich das Fahrrad realitätsgetreu bewegen. Ein Nachteil dieser Art von Anlage ist, dass zum einen große Flächen benötigt werden und bei den niedrigen Prüfenergien und damit niedrigen Geschwindigkeiten es sehr schwer ist, das Fahrrad auszubalancieren ohne dabei Einfluss auf das Crashverhalten zu nehmen.

Um bestehende Testverfahren realitätsgetreuer zu gestalten, ist es sinnvoll mit eingebautem Vorderrad zu testen, da es einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf das Stoßverhalten hat. Beim Aufprall ist das Fahrrad frei schwebend (Abbildung 40), der Fahrer wird bei diesen Geschwindigkeiten vom Fahrrad geschleudert und durch die Wucht des Aufpralles knickt das Vorderrad ab und die Gabel bricht.

Die DIN EN 14766 mit ihren Prüfungen stellen den Stand der Technik dar und sollen auch weiterhin nachgewiesen werden. Diese Normen zeigen die Minimalanforderungen an Fahrräder verschiedener Typen. Die Klassifizierung der einzelnen Fahrradklassen sollte überarbeitet und dazugehörige Betriebslasten ermittelt werden. Auf der Grundlage dieser Daten müssen die Normen geprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Für die Ansprüche der Hersteller mit gehobenen Qualitätsansprüchen sollte die Möglichkeit geschaffen werden, sich diese Ansprüche bzw. die Qualität der Fahrräder abhebend von den Mindestanforderungen zertifizieren lassen zu können.

## 13 Verzeichnisse

### 13.1 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1	Auflistung der Konstruktionsprinzipien starrer und gefederter Modelle aller Gebrauchsnutzertypen	8
ABBILDUNG 2	Bestandteile des Fahrrades	11
ABBILDUNG 3	Gabelmuffen	12
ABBILDUNG 4	Starrgabeltypen	12
ABBILDUNG 5	Konventioneller Steuersatz	12
ABBILDUNG 6	Gabelschaft	12
ABBILDUNG 7	Steuerlager mit Aheadvorbau	14
ABBILDUNG 8	Einfache Nabenausführung mit Vollachse	15
ABBILDUNG 9	Belastung bei Vertikalstoß	15
ABBILDUNG 10	Rahmengenometrieerfassung	17
ABBILDUNG 11	Skizze Pendelschlagwerk	18
ABBILDUNG 12	Beispielbild für den allgemeinen Zustand der Räder von BASF nach der Darstellung von Verkehrsunfällen (Verkehrsunfällen) durch den Stuntfahrer	21
ABBILDUNG 13	Schnittansicht Steuerrohrbereich Schieberrahmen	22
ABBILDUNG 14	Kugellagerabdrücke in den Lagerschalen	23
ABBILDUNG 15	Rissmuster in belasteten Platten	25
ABBILDUNG 16	Risslinien auf Proberahmen	27
ABBILDUNG 17	Querrisse	27
ABBILDUNG 18	Belastungsfälle	28
ABBILDUNG 19	Wheatstone Vollbrücke mit 4 Widerständen	35
ABBILDUNG 20	Anwendungsformen der Wheatstone'schen Brückenschaltung in der DMS-Technik	37
ABBILDUNG 21	Zugstab mit Messtechnik	38
ABBILDUNG 22	Biegestab mit Messtechnik	39

ABBILDUNG 23	Prüfaufbau der Stoßprüfung, Rahmen-Gabel-Einheit: Aufschlagprüfung	42
ABBILDUNG 24	Prüfaufbau der Stoßprüfung, Rahmen-Gabel-Einheit: Stoßprüfung (fallender Rahmen)	43
ABBILDUNG 25	dynamische Prüfung mit horizontalen Kräften	43
ABBILDUNG 26	Stoßprüfung nach EN 14764	47
ABBILDUNG 27	Stoßprüfung nach DIN plus	49
ABBILDUNG 28	Skizze zum Versuchsaufbau „Crashfahrt“, Fahrrad gegen Wand	51
ABBILDUNG 29	Datenlogger DL16	52
ABBILDUNG 30	Schlagpendel der Fa. velotech.de	53
ABBILDUNG 31	Hammerscheibe mit Schlagkeil	54
ABBILDUNG 32	Stahlkeil und Bestandteile	54
ABBILDUNG 33	Kautschukscheibe mit Befestigungsteilen	54
ABBILDUNG 34	Bremssteifigkeitsprüfstand Fa. velotech.de	57
ABBILDUNG 35	Versuchsaufbau mit angeschlossener Messtechnik	61
ABBILDUNG 36	Versuchsrads Alu MTB I mit Messtechnik	70
ABBILDUNG 37	Skizze zur statischen Lastenuntersuchung	72
ABBILDUNG 38	Sitzpositionen auf verschiedenen Fahrradtypen	75
ABBILDUNG 39	Crashtestaufbau der schweizer DEKRA	80
ABBILDUNG 40	Einschlag des Fahrrades in die Fahrzeugtür	81

## 13.2 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 MESSGITTERWERKSTOFFE .....	32
TABELLE 2 ZUSAMMENFASSUNG DER NORMANFORDERUNGEN .....	41
TABELLE 3 ANLIEGENDE MOMENTE AN DER STEUERROHRUNTERSEITE BEI UNTERSCHIEDLICHEN GABELLÄNGEN (HEBELWIRKUNG) .....	46
TABELLE 4 VERGLEICH DER RADSTANDVERKÜRZUNGEN MIT DEM PRÜFSTAND .....	63
TABELLE 5 AUFPRALLGESCHWINDIGKEITEN MIT DEN ZUGEHÖRIGEN ENERGIEN UND DEN DARAUS RESULTIERENDEN RADSTANDVERKÜRZUNGEN .....	65
TABELLE 6 VERGLEICH FAHRVERSUCHE/ PRÜFSTAND STAHLRAHMENRÄDER .....	66
TABELLE 7 VERGLEICH BREMSSTEIFIGKEIT .....	67
TABELLE 8 VERGLEICH FAHRVERSUCHE/ PRÜFSTAND ALU MTB I.....	68
TABELLE 9 BENÖTIGTE POTENTIELLE ENERGIE ZUM ANHEBEN DES HINTERRADES BEIM FRONTALCRASH .....	73
TABELLE 10 ERGEBNIS DES VERGLEICHES BEIM STAHLRAHMEN .....	75
TABELLE 11 ERGEBNIS DES ALUMINIUM MTB I .....	76
TABELLE 12 WERKSTOFFVERGLEICH DIN EN 10025 S185 UND EN AW-7005 .....	76

### 13.3 Diagrammverzeichnis

DIAGRAMM 1 KALIBRATION ALU MTB I; AUSGABE DER MESSSPANNUNG DER DMS58	
DIAGRAMM 2 KALIBRIERUNG ALU MTB I; FEDERRATE DES RAHMENS, EINSTELLUNG DER MESSMITTEL .....	59
DIAGRAMM 3 VERGLEICH DER PRALLSYSTEME; KAUTSCHUK UND STAHL BEI 120J UND 150J.....	64
DIAGRAMM 4 FEDERRATE DES STAHLRAHMENS .....	66
DIAGRAMM 5 VERSUCHSFAHRTEN 4.4 UND 4.5 MIT ALU MTB I .....	69

## 13.4 Literaturverzeichnis

- [Gieck 2005] Gieck, Kurt; Gieck, Reiner: Technische Formelsammlung, Germering 2005, Gieck Verlag GmbH, 31. deutsche Auflage
- [RoMa 2005] Muhs, Dieter; Wittel, Herbert; Jannasch Dieter; Voßiek Joachim: Rohloff/ Matek Maschinenelemente, Wiesbaden 2005, Vieweg & Sohn Verlag, 17. Überarbeitete Auflage
- [Keil 1995] Keil, Stefan: Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmessstreifen, Zwingenberg a. d. Bergstr 1995, Cuneus
- [Hoffmann 1987] Hoffmann, Karl: Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen, Darmstadt 1987 Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
- [INA 2002] Palland, Ernst- Günter: Technisches Taschenbuch, Herzogenaurach 2002, Schaeffler KG
- [Fachkundebuch Fahrradtechnik 2009] Gressmann, Michael: Fachkunde Fahrradtechnik, Borken 2009, Verlag Europa-Lehrmittel, 3. Auflage
- [Bio 2009] Gressmann, Michael: Fahrradphysik und Biomechanik, Kiel 2009, 10. Überarbeitete Auflage
- [Neuß 2004] Neiß, Juliane <info@junik-hpf.de>: Richtig sitzen, <http://www.fa-technik.adfc.de/Ratgeber/Sitzen/>, verfügbar am 27.02.2004
- [SF 2010] Schweizer Fernsehen, Magazin 10 vor 10: Gefährliche E-Bikes <http://videoportal.sf.tv/video?id=583a9e0d-ae30-4dfe-83d7-35b14ef1f047>, verfügbar am 01.07.2010
- [Experimentelle Methoden der Spannungsanalyse 2009] Ferber, Ferdinand: Skript Experimentelle Methoden der Spannungsanalyse, Universität Paderborn 2009, 2009]
- [VDI Werkstoffkunde 16] Weißbach, Wolfgang: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, Wiesbaden 2007, Vieweg & Sohn Verlag, 16 Auflage

- [velotech.de 2010] Leitholdt, Silvio: Prüfstands- und Messtechnikabbildungen für Fahrradprüftechnik, Schweinfurt 2010
- [Fa. Tellert] Tellert Elektronik GmbH, Werneck
- [EN AW-7005] Aluminiumwerkstoffe, Merkblatt W2, Aluminiumzentrale
- [DIN EN 10025-2] DIN EN 10025-2 Tabelle 5
- [DIN 79100] DIN 79100 2000, Fahrräder Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren (2000)
- [EN 14764] DIN EN 14764, City- und Trekking-Fahrräder-Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren (2005)
- [EN 14765] DIN EN 14765, Kinderfahrräder-Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren (2005)
- [EN 14766] DIN EN 14766, Geländefahrräder (Mountainbikes)-Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren (2005)
- [EN 14781] DIN EN 14781, Rennräder – Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren (2005)
- [Tötz 2006] Totzauer, Werner: Vorlesung Technische Mechanik I WS 06-07, HS-Mittweida (FH)
- [Solid 2007] Engelkern, Gerhard: 3D Konstruktion mit SolidWorks, Rüsselsheim 2007, Carl Hanser Verlag, 2. Auflage



## 14 Anhang

## 14.1 Materialgutachten

Hochschule Mittweida (FH)  
University of Applied Sciences

## 1. Untersuchungsergebnisse

### 1.1. Chemische Zusammensetzung

**1.1: Chemische Zusammensetzung**  
Verfahren: Vakuumemissionsspektroskopie nach DIN 51009  
Gerätekennzeichnung: Optisches Emissionsspektrometer „GVN-514S“  
Referenzprobe: BAM 187-1  
Soll-Werkstoff: S133

Element	Ist in % Rohrdickwandig Stückanalyse	Ist in % Rohrdünnwandig Stückanalyse	Soil in % S63 nach DIN 17100
C	0.043	0.032	
Si	0.012	0.000	
Mn	0.283	0.279	
P	0.0161	0.0210	
S	0.0069	0.0097	
Cr	0.009	0.056	
Ni	0.015	0.056	
Mo	0.000	0.005	
Cu	0.0162	0.0639	
Co	0.00	0.00	
V	0.000	0.000	
W	0.00	0.00	
Al	0.0196	0.0155	
Ti	0.000	0.003	
Nb	0.000	0.000	
B	0.0000	0.0001	
Sn	0.0005	0.007	
Pb	0.000	0.000	
Ca	0.000	0.0000	
As	0.006	0.005	

Angaben in Masse%

Gemäß DIN 17100 (Ausgabe Januar 1980; mittlerweile ungültig) gibt es keine Vorgaben zur chemischen Zusammensetzung des Materials S33. Hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung handelt es sich bei den Rohwerkstoffen (dicke, dünnwandig) vermutlich um unterschiedliche Chargen. Wahrscheinlich handelt es sich um dieselbe Materialquote.

## 1.2. Härte Rohr dickwandig

**1.2. Harte Rohre dickwandig**  
Verfahren: Vickers-Härteprüfung nach DIN EN ISO 6507-1  
Geräte-technik: Universal-Härteprüfgerät HPO 250  
Prüfstelle: Bauteilkernbereich (geschliffen)

St33 nach DIN 1615	1st
$R_m = 290 - 540 \text{ N/mm}^2$ $R_{m, \text{max}} = 536 \text{ N/mm}^2$ entspricht $R_m = 536 \text{ N/mm}^2$ (Umwertung nach DIN EN ISO 18255, Tabelle A1)	167 HV 10

	(Umwertung)
Der Wert für HV10 wurde aus 5 Einzelmessungen gebildet.	

Hochschule Mittweida (FH)  
 Fachgruppe Werkstofftechnik/Oberflächentechnik  
 Technikumplatz 17  
 09648 Mittweida

Bauteilname: Fahrradbauteile	
Charge:	
And.index:	
Lieferant:	
WE-Nr.:	
Material/ Schicht:	
Prüfung: nach Absprache chemische Analyse, Härte, Gefüge	

Unsere Prüfberichts-Nr.: XXX-09

Ihre Prüfauftrags-Nr.:

Auftraggeber: Herr Leitholdt

Bearbeiter: Herr DI Poschmann

Bearbeiter:

Die Prüfleistungen beziehen sich ausschließlich auf den o. g. Prüfungsauftrag und die damit übergebenen Prüfstände.

1.3. Bilddokumentation Rohrdickwandig

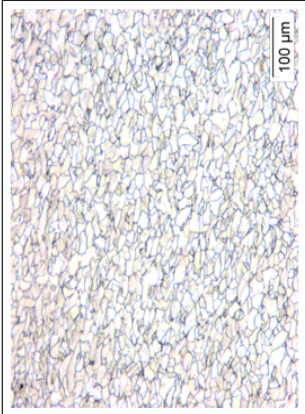


Bild 1: Rohrdickwandig (Längsschliff)  
Ferrit  
Nital-Ätzung  
PMG3 Obj.10x/0,25; Color View II;  
analysis: ImageC

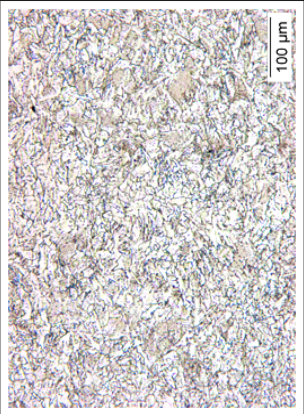


Bild 2: Rohrdickwandig (Querschliff)  
Ansicht 1  
Schweißgefüge  
Nital-Ätzung  
PMG3 Obj.10x/0,25; Color View II;  
analysis: ImageC

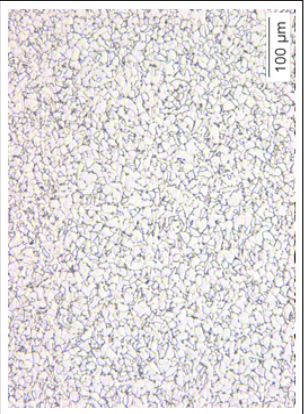


Bild 3: Rohrdickwandig (Querschliff)  
Ansicht 2  
Ferrit  
Nital-Ätzung  
PMG3 Obj.10x/0,25; Color View II;  
analysis: ImageC

1.4. Bilddokumentation Lagerschale



Bild 4: Lagerschale (gerissen)  
SZH10 Zoom 1; Color View II;  
analysis: ImageC

- Ende des Prüfberichtes -

## 14.2 Kugeleindruckkräfte

Härtemessung nach Brinell :

$$HBS = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Kraftermittlung (N) :

$$F = \frac{HBS \cdot \pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{0,102 \cdot 2}$$

F in kp

D= Kugeldurchmesser

d= Durchmesser Abdruck

HBW= Härte nach Brinell

Durchmesser in mm

Härte

Kugel

63

3,96

Lagerschale

45

Umrechnungs-  
faktor

9,80665

Messung	Abdruck 1	Abdruck 2	Abdruck 3
Prüfling 1	0	0	0
Abdruck DM	0	0	0
F in N	0	0	0
Prüfling 2 (D)	0,0492	0,0779	0,036
Abdruck DM (d)	0,877294386	1,099847	0,75170207
F in N	270,0365159	427,5578	197,587695
Prüfling 3 (D)	0,112	0,15	0,044
Abdruck DM (d)	1,312975247	1,511952	0,83019034
F in N	614,717272	823,2821	241,496071

## 14.3 Datenblatt Kraftmessdose

<b>SH 755</b>
<b>HBM</b>
<b>07-06</b>

Tabelle 1

<b>Soll-Werte</b>		<b>Ist-Werte</b>			
Einheit in:	N	Einheit in:	N		Fehler
1. Messreihe		1. Messreihe	2. Messreihe	Abweichung	% v. Endwert
0,00		0	0	0,0	0,00
500,00		499	500	0,0	0,00
1000,00		999	999	-1,0	-0,02
1500,00		1499	1499	-1,0	-0,02
2000,00		2000	1999	-1,0	-0,02
2500,00		2499	2499	-1,0	-0,02
3000,00		3000	3000	0,0	0,00
3500,00		3500	3500	0,0	0,00
4000,00		4001	4000	0,0	0,00
4500,00		4502	4501	1,0	0,02
5000,00		5003	5003	3,0	0,06
0,00		0	0	0	0,00

## 14.4 Rahmengeometrie eines Stahlprüflings vor und nach dem Test

**Prüfling:**

**#7 vor dem Schlagversuch**

Rahmenhöhe:	B2D	551	mm
Steuerrohrlänge:	A2E	138	mm
effektive Oberrohrlänge:	AB	638	mm
Radstand:	FG	1158	mm
Kettenstrebenlänge:	DG	485	mm
Steuerrohrwinkel:		65,9	°
Sitzwinkel:		66,5	°
Absenkung des Tretlagers		45	mm
sloping Oberrohr:		3,4	°
Nachlauf:		98	mm
Gabelwinkel:		60,1	°
Durchstiegshöhe		815	mm
Gabelweite (innen - innen)	Gb		mm
Hinterbauweite (innen - innen)	Hbb		mm
Tretlagerbreite	Tlb		mm
Höhe Tretlager		313	mm
Größe Vorderes Laufrad		28	Zoll
Größe Hinteres Laufrad		28	Zoll
Gesamtlänge Fahrrad		1873	mm

Kettenlinie vorn	Klv		mm
Kettenlinie hinten	Kasb		mm

Vorderer Aufstand	AufV		mm
Hinterer Aufstand	AufH		mm
Mitte Vorbau	Vb		mm

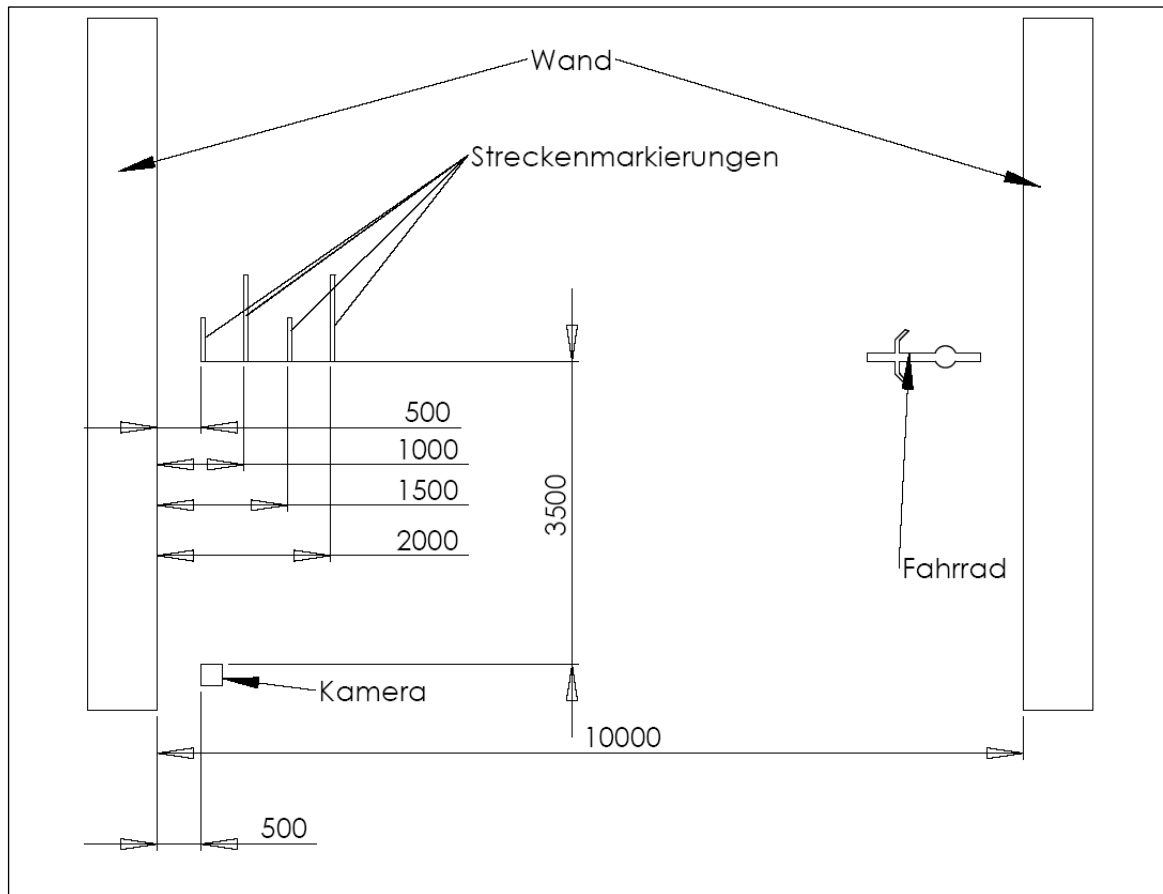
**Prüfling:****#7 nach dem Schlagversuch**

Rahmenhöhe:	B2D	549	mm
Steuerrohrlänge:	A2E	138	mm
effektive Oberrohrlänge:	AB	647	mm
Radstand:	FG	1053	mm
Kettenstrebenlänge:	DG	483	mm
Steuerrohrwinkel:		75,0	°
Sitzwinkel:		65,6	°
Absenkung des Tretlagers		30	mm
sloping Oberrohr:		6,7	°
Nachlauf:		54	mm
Gabelwinkel:		70,6	°
Durchstiegshöhe		839	mm
Gabelweite (innen - innen)	Gb		mm
Hinterbauweite (innen - innen)	Hbb		mm
Tretlagerbreite	Tlb		mm
Höhe Tretlager		327	mm
Größe Vorderes Laufrad		28	Zoll
Größe Hinteres Laufrad		28	Zoll
Gesamtlänge Fahrrad		1768	mm

Kettenlinie vorn	Klv		mm
Kettenlinie hinten	Kasb		mm

Vorderer Aufstand	AufV		mm
Hinterer Aufstand	AufH		mm
Mitte Vorbau	Vb		mm

## 14.5 Skizze Versuchsablauf



## 14.6 Beispielbilder von Fahrrädern der BASF



Fahrrad nach dem Frontalstoß mit einem Hinderniss.



Knick am Übergang Oberrohr-Sattelrohr.



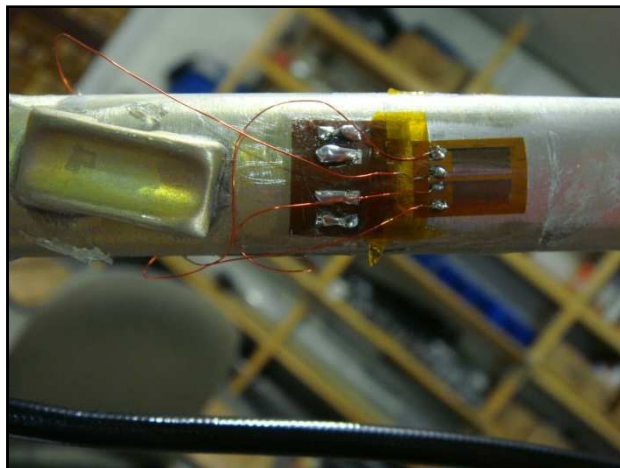
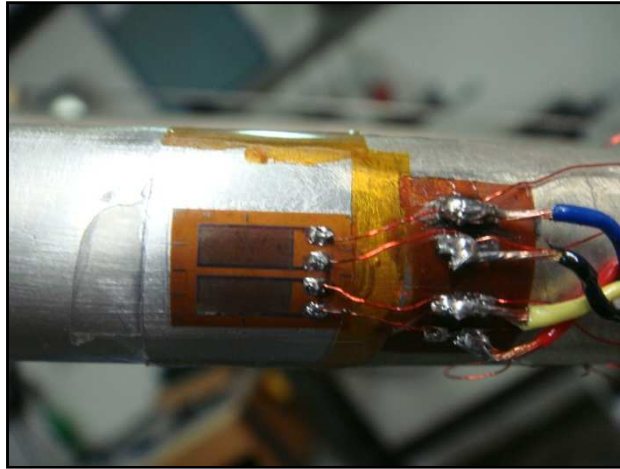
Erster Stahlrahmen nach dem schlagen auf dem Prüfstand. Deutliche Verformungen an Ober- und Unterrohr sind zu erkennen, ein leichtes einknicken an der Verbindungsstelle Oberrohr-Sattelrohr ist ebenfalls feststellbar.



## 14.7 Verformungsdaten der Räder von BASF

Kennzeichen	Fahrgestellnr.	Hersteller	Baujahr	Gewicht	Radstand	RH	OR	Gabeltyp	Steuersatz	Steuerröhrlänge	OR komplett	Steuersatzmerkmal
202076	212330011	Dercy	2009	19,52	1050	560	590	1" UniCrown		210	520	
82061	F9625529	Falter	1956	17,75	815	560	505	1" UniCrown		140		
82611	F9625317	Falter	1956	17,09	834	560	508	1" UniCrown		140	535	
90838	F0101449	Falter	2002	18,1	956	560	512	1" UniCrown		140	545	
50488	F633181	Falter	1984	18,5	909	560	517	1" Außenmuffe		140		
85459	F96345816	Falter	1958	17,75	858	560	517	1" UniCrown		140	548	
719	F00408458	Falter	2001	17,57	959	560	518	1" UniCrown		140	544	
83308	F97291531	Falter	1957	17,18	1007	560	518	1" UniCrown		140	545	
85357	F96345689	Falter	1958	17,22	804	560	518	1" UniCrown		140	535	
92152	F02013212	Falter	2003	17,54	954	560	518	1" UniCrown		140	545	
62590	F728314	Falter	1951	17,55	1038	560	520	1" Außenmuffe 6,5" verbogen		140	545	
82976	F97238025	Falter	1957	17,57	1025	560	520	1" UniCrown		140	535	
85615	F96337824	Falter	1958	18,75	1018	560	520	1" UniCrown		140	545	
85707	F96344847	Falter	1959	19,01	934	560	520	1" Außenmuffe		140	540	
58386	F00753540			18,62	977	560	521	1" Außenmuffe 12" verbogen		140	543	
93147	F03027337	Falter	2004	17,5	918	560	522	1" UniCrown		140	545	
100474	F03026654	Falter	2003	18	1143	560	522	1" UniCrown		140	550	
62021	F05805648			16,65	1005	560	523	1" Außenmuffe 8,5" verbogen		140	545	
83400	F97301827	Falter	1957	18,67	998	560	523	1" UniCrown		140	547	
95608	F03023258	Falter	2003	17,54	1053	560	523	1" UniCrown		140	545	
830	F95374116	Falter	1959	17,39	998	560	525	1" UniCrown		140	545	
83792	F97297095	Falter	1957	17,68	955	560	525	1" UniCrown		140	545	
83954	F97315550	Falter	2005	19,1	900	560	525	1" UniCrown		140	545	
85301	F96347244	Falter	1958	17,19	1023	560	525	1" UniCrown		140	545	
87390	F00330038	Falter	2005	17,8	1110	560	525	1" UniCrown		140	545	
87953	F00400135	Falter	2000	17,39	1018	560	525	1" UniCrown		140	544	
91785	F02015036	Falter	2002	17,76	1043	560	525	1" UniCrown		140		
97457	F0001074			18,56	917	560	525	1" Außenmuffe 8" verbogen		140	545	
F72177	F72177	Falter		18	1040	560	525	1" Außenmuffe		140	549	

## 14.8 Bilder Applizierter DMS



Applizierung der DMS als Vollbrücke. Nach der Applizierung werden die DMS mit einem Schutzlack (Einkomponenten-Polyurethanlack) versehen. Nach dem trocknen des Lacks werden die DMS zum Schutz vor mechanischen Einwirkungen mit zähem Kitt (AK22 Fa. HBM) ummantelt. Da der Kitt eine klebrige Konsistenz besitzt wird die Messstelle zusätzlich mit Aluminiumfolie umhüllt.

## 14.9 Eidesstattliche Erklärung

Name: Leitholdt

Vorname: Silvio

Matr.-Nr.: 16846

Erklärung:

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegeben Hilfsmittel angefertigt habe.

Oberwiera, den 29.09.2010

---

Silvio Leitholdt